



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta stavební
Katedra geomatiky**

Testování možností laserového skeneru BLK360

Options testing of the BLK360 Laser Scanner

Diplomová práce

Studijní program: Geodézie a kartografie
Studijní obor: Geomatika

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Karel Pavelka

Bc. Karolína Nesrstová

Praha 2018



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Bc. Nesrstová Jméno: Karolína Osobní číslo: 423988
Zadávající katedra: katedra geomatiky
Studijní program: geodézie a kartografie
Studijní obor: geomatika

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Testování možností laserového skeneru BLK360

Název diplomové práce anglicky: Options testing of the BLK360 Laser Scanner

Pokyny pro vypracování:

Vypracujte rešerši obecně na 3D skenery a jejich testování. Zaměřte se na testování možností laserového skeneru BLK360: 1/ meze použitelnosti automatické registrace mračen v závislosti na geometrii a morfologii tvaru použitého k registraci, 2/ závislost dostupnosti a kvality registrace na ohledem na přesnost horizontace přístroje vybaveného IMU jednotkou, 3/ závislost dostupnosti a kvality registrace na terče s různou mírou kontrastu a s uvážením závislosti detekce terčů na různou skenovanou vzdálenost, 4/ měření v mezních stavech nabití baterie (cca 40%). Zjištění rizik a vlivu na kvalitu skenování. Zhodnoťte postupy a proveďte analýzu výsledků.

Seznam doporučené literatury:

Štroner, M.; Pospíšil, J.; Koska, B.; Křemen, T.; Urban, R.; Smítka, V.; Třasák, P. 3D skenovací systémy. ČVUT v Praze, 2013. vol. 1. ISBN 978-80-01-05371-3.

Jméno vedoucího diplomové práce: prof. Dr. Ing. Karel Pavelka

Datum zadání diplomové práce: 19.2.2018

Termín odevzdání diplomové práce: 20.5.2018

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku


Podpis vedoucího práce


Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

1.3.2018
Datum převzetí zadání


Podpis studenta(ky)



Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala sama pouze s pomocí vedoucího práce Prof. Dr. Ing. Karlem Pavelkou a s odbornými konzultacemi s pracovníky firmy Gefos a. s., odkud byl zapůjčen testovaný skener BLK360.

Dále prohlašuji, že veškeré použité podklady jsou uvedeny v seznamu literatury na konci diplomové práce.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....

podpis



Poděkování

Mé poděkování patří především vedoucímu práce prof. Dr. Ing. Karlovi Pavelkovi za odborné vedení, rady a čas, který mi během zpracování diplomové práce věnoval. Dále děkuji paní Ing. Ivaně Kociánové, panu Bc. Janu Švejdovi a dalším zaměstnancům z firmy Gefos a. s. za poskytnuté rady, prostředky a čas, kterými mi byli nápomocni při měření a následném zpracování měřených dat.



ABSTRAKT

Předmětem této diplomové práce bylo vypracování rešerše obecně na 3D skenery a následné testování možností laserového skeneru Leica BLK360. Testování bylo zaměřeno na praktické využití přístroje, neboť testovaný přístroj je ve své kategorii unikátní především velikostí a váhou. Bylo tedy testováno, zda tyto výhody mají vliv na kvalitu skenování.

KLÍČOVÁ SLOVA

Laserové skenování, bodové mračno, testování, analýza, registrace dat, přesnost

ABSTRACT

The main subject of this thesis was to write a literature research in general about 3D scanners and the options testing of the BLK360 Laser Scanner. Testing was focused on practical usability of the scanner because this tested device is unique in its category, especially in size and weight. It was tested whether these benefits affect the quality of the scan.

KEYWORDS

Laser scanning, point cloud, testing, analyses, registration of the data, accuracy



Obsah

Seznam zkratk	7
1. Úvod	8
2. Přehled 3D skenovacích systémů - řešerše	9
2.1. Dělení 3D skenerů	9
2.1.1. Mobilní skenery	10
2.1.2. Terestrické skenery	11
2.1.3. Optické skenování	14
3. Zpracování dat 3D laserového skenování	16
3.1. Software pro zpracování dat 3D laserového skenování	17
3.1.1. Prohlížeče mračen bodů	17
3.1.2. Software pro registraci dat	17
3.1.3. Software pro tvorbu 3D modelu	18
4. Testování laserového skeneru BLK360	19
4.1. Automatická registrace mračen	21
4.1.1. Popis experimentu	21
4.1.2. Postup měření	23
4.1.3. Postup zpracování	23
4.1.4. Analýza výsledků	26
4.1.5. Porovnání relativních vzdáleností od mračna získaného pomocí skeneru Surphaser 25HSX	32
4.2. Funkce přístroje vybaveného IMU jednotkou	38
4.2.1. Popis experimentu	38
4.2.2. Postup měření	39
4.2.3. Postup zpracování	39
4.2.4. Analýza výsledků	39
4.3. Registrace pomocí terčů	44
4.3.1. Popis experimentu	44
4.3.2. Postup měření	46
4.3.3. Postup zpracování	46
4.3.4. Analýza výsledků	46
4.4. Měření v mezních stavech nabití baterie	51
4.4.1. Popis experimentu	51
4.4.2. Postup měření	51
4.4.3. Postup zpracování	51
4.4.4. Analýza výsledků	52
5. Rekapitulace výsledků a zhodnocení možností použitelnosti BLK360	54
6. Závěr	57
Seznam obrázků	59
Seznam tabulek	61
Obsah CD	61
Zdroje informací a použitá literatura	62



Seznam zkratek

CAD	<i>Computer Aided Design</i> – počítačem podporované projektování
CCD	<i>Charge Coupled Device</i> – zařízení s vázanými náboji
DMR	Digitální model reliéfu
DMP	Digitální model povrchu
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i> – globální navigační družicový systém
HDR	<i>High Dynamic Range</i> – vysoký dynamický rozsah
IBMR	Image Based Modelling and Rendering
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i> – inerciální měřicí jednotka
LED	<i>Light Emitting Diode</i> – elektroluminiscenční dioda
LLS	Letecké laserové skenování
RPAS	<i>Remotely Piloted Aircraft System</i> – dálkově pilotovaný letající systém
USB	<i>Universal Serial Bus</i> – rozhraní pro připojení přídatného hardware
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i> – bezdrátová počítačová síť



1. Úvod

Tato diplomová práce je souhrnem dostupné literatury o 3D laserovém skenování a dále poskytuje obecný přehled o principech fungování 3D skenovacích systémů. Cílem práce není průzkum trhu v oblasti laserových skenerů, protože 3D laserové skenování je stále poměrně novou technologií, která se vyvíjí rychle kupředu. Nicméně pro názorné vysvětlení určité problematiky mohou být použity konkrétní případy.

Dále je práce zaměřena na jeden konkrétní skener, Leica BLK360, který byl postupně testován na různé parametry a za různých podmínek. Testování skeneru bylo zaměřeno na automatickou registraci mračen a její použitelnost v závislosti na morfologii a tvaru objektu, dále na kvalitu registrace s ohledem na přesnost horizontace přístroje vybaveného IMU jednotkou a na možnost detekce terčů s různou mírou kontrastu a na různou skenovanou vzdálenost.

Nedílnou součástí této práce jsou popisy jednotlivých testů zahrnující postup při měření, následné zpracování bodového mračna a zhodnocení výsledků. Důraz je kladen také na zjištění rizik a vlivů působících na kvalitu skenování.



2. Přehled 3D skenovacích systémů - rešerše

3D skenovací systém je zařízení určující prostorové souřadnice diskrétních bodů objektu a skládá se ze skenovací jednotky, řídicí jednotky, software pro řízení skenování i pro zpracování a příslušenství (stativ, baterie, terče, atd.), *Kašpar (2003)*. Výsledkem skenování je mračno bodů, které v závislosti na rozsahu měřeného objektu a nastavených parametrech může obsahovat až stovky miliónů bodů.

3D skenování je technologií, která se velmi rychle vyvíjí a ve srovnání s klasickým geodetickým měřením je značně rychlejší, automatizovanější a snazší. Na trhu se objevují stále nové skenery, které umožňují čím dál rychlejší a přesnější měření, s vyšším rozlišením, a tedy i s vyšším počtem naskenovaných bodů. Avšak najít vhodný software pro zpracování takto objemných dat je komplikovanější. Tudíž často dochází k ředění dat, čímž nastavené vysoké rozlišení při měření ztrácí význam. Problematikou hardware a zpracování dat 3D laserového skenování se zabývá také například *Bernardini (2002)*.

2.1. Dělení 3D skenerů

Podle použitého zdroje záření můžeme skenovací systémy rozdělit do dvou skupin, skenery používající lasery a skenery používající projektory. U klasických laserových skenerů je délka k určovanému bodu určována pomocí laseru, což je zdroj koherentního elektromagnetického záření nejčastěji v oblasti viditelného nebo infračerveného záření, který vzniká díky stimulované emisi fotonů; k měřené délce se ukládají dva úhly – vodorovný a svislý úhel, pod kterým byl paprsek vyslán; jedná se tak geodeticky o prostorovou polární metodu měření bodu. Triangulační 3D skenery užívají též laser, ale obvykle pouze jako laserového ukazovátka, jeho stopa na předmětu je sledována kamerou a výpočet prostorové polohy bodu na objektu je určen trigonometricky. Určitou skupinou jsou 3D skenery, využívající princip obrazové korelace a kamer. Je-li použit projektor, zdrojem záření je projekční výbojka, kamerami se snímá vysílaný rastr a výpočet prostorové polohy bodu opět probíhá trigonometricky ze snímkových souřadnic. (*Štroner, 2013*)



Dále mohou být 3D skenery rozděleny dle různých kritérií. Jak uvádí *Štroner (2013)*, některými z možností je dělení podle umístění skeneru při skenování, podle principu měření, dosahu, přesnosti určení polohy bodu nebo rychlosti skenování.

Podle umístění skeneru při skenování dělíme skenery na mobilní a terestrické. Tyto dvě skupiny jsou popsány v následujících podkapitolách 2.1.1. a 2.1.2.

2.1.1. Mobilní skenery

Problematikou mobilních skenovacích systémů se zabývá například *Pavelka a kol. (2014)* nebo *Vosselman (2010)*. Jak je řečeno v těchto publikacích, mobilní skenovací systémy jsou takové systémy, které jsou při samotném skenování v pohybu. Skenery mohou být umístěny na letadle, automobilu, lodi, vlaku, či jiných dopravních prostředcích.

Hlavními komponenty tvořícími mobilní laserové skenovací systémy jsou laserový skener a GNSS/IMU kombinace. Laserový skener slouží k měření vzdálenosti k místu/objektu na zemském povrchu. GNSS/IMU měří okamžitou polohu a zároveň pomocí gyroskopů a akcelerometrů určuje orientaci systému.

Při využití leteckého laserového skenování (LLS) je laserový skener umístěn na letadle, vrtulníku nebo na dálkově řízených létajících systémech (RPAS). LLS se nejčastěji používá pro tvorbu DMR či DMP, ale má své využití také v batymetrii, což je obor zabývající se měřením hloubky moře.

Mobilního laserového skenování se využívá především pro mobilní mapovací systémy, které umožňují získat prostorové informace blízkého okolí za plného provozu, což má značný pozitivní vliv na rychlost sběru dat. Tato metoda je tak využitelná například při mapování uliční sítě, liniových staveb nebo nadzemního elektrického vedení. Jedním z nejpoužívanějších dopravních prostředků pro tyto účely bývá osobní automobil. (*Pavelka a kol., 2014*), (*Vosselman, 2010*)

Další dělení mobilních skenerů není předmětem této práce, neboť práce je zaměřena především na terestrické skenovací systémy. Nicméně principy popsané v následující kapitole jsou (do jisté míry) aplikovatelné i na mobilní skenování,

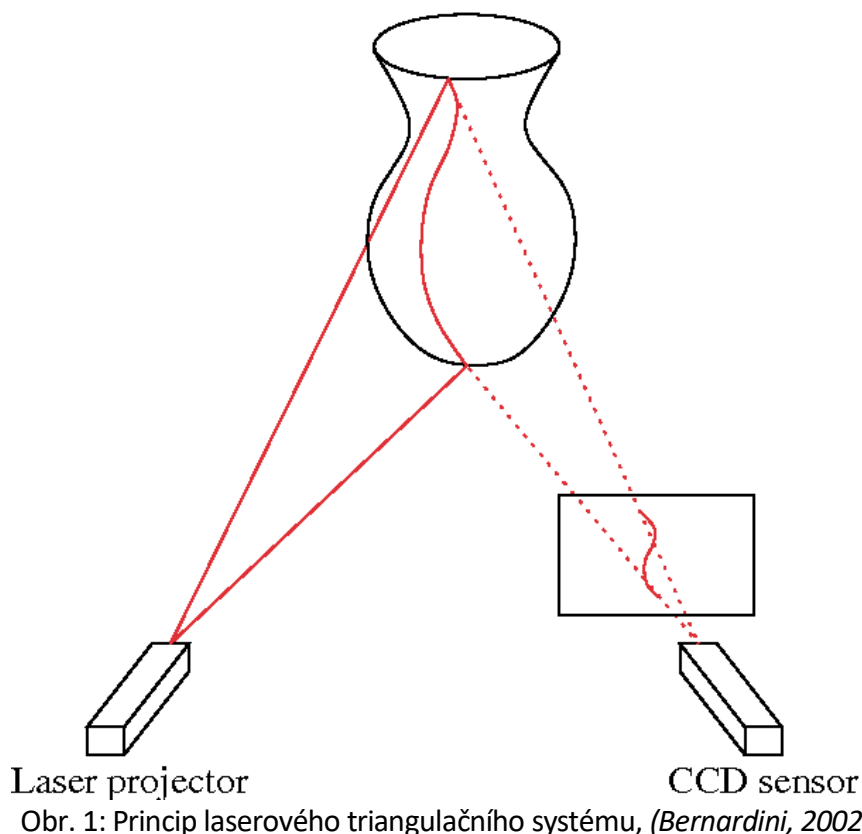
samozřejmě s jistými výjimkami, kdy například triangulační metoda je pro LLS nepoužitelná z důvodu krátkého dosahu.

2.1.2. Terestrické skenery

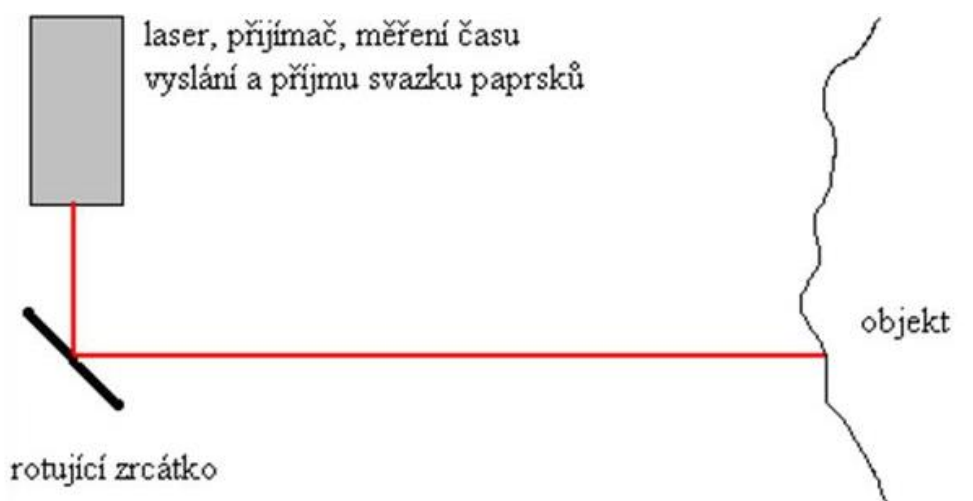
Terestrické skenovací systémy jsou takové systémy, které jsou v okamžiku měření pevně spojeny se zemským povrchem. Nejčastěji se používá statických skenovacích systémů umístěných na stativu.

Detailnímu dělení podle různých kritérií se věnuje *Pospíšil* ve druhé kapitole knihy *Štroner (2013)*. Pro účely této diplomové práce byl vybrán jeden ze způsobů dělení, který je rozepsán níže v této kapitole. Jedná se o dělení podle principu měření a vychází z publikací

Obecně bychom 3D skenery mohli rozdělit na skenery se základnou a na polární skenery. Skenery se základnou používají k určování vzdálenosti triangulační metody, proto se jim také často říká triangulační skenery. Tato situace je znázorněna na obrázku 1 a jsou podrobněji popsány v kapitole 2.1.2.1., *Bernardini (2002)*.



Polární skenery jsou takové skenery, které přímo měří prostorovou vzdálenost, a to pomocí tranzitního času nebo vzniklého fázového rozdílu. Těmto metodám se věnují kapitoly 2.1.2.2. a 2.1.2.3. Obecný princip měření pomocí polárních skenerů je znázorněn na obrázku 2.



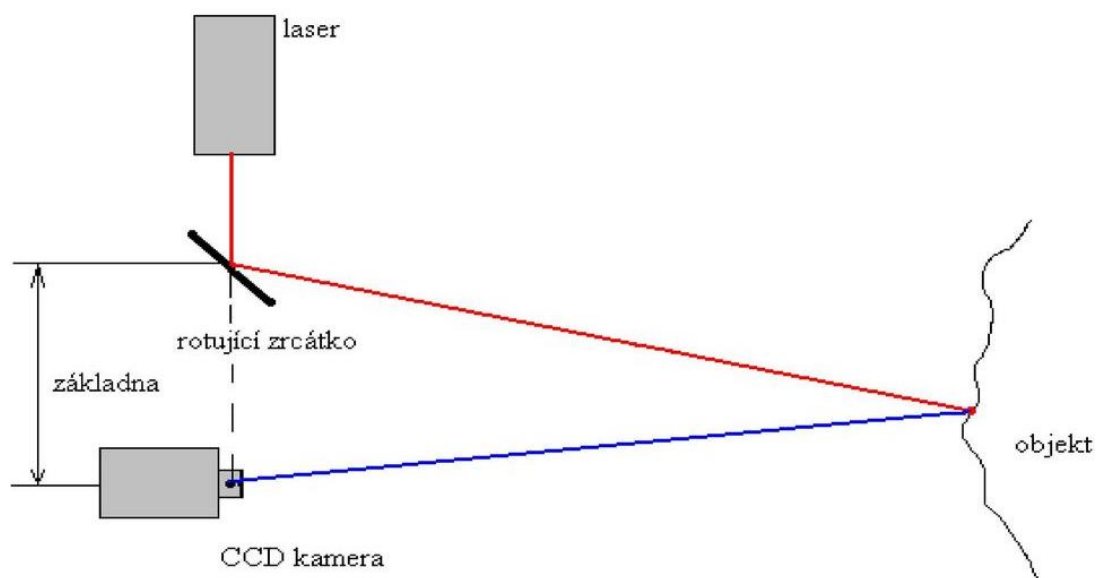
Obr. 2: Princip měření polárního skeneru (Štroner, 2013)

2.1.2.1. Triangulační

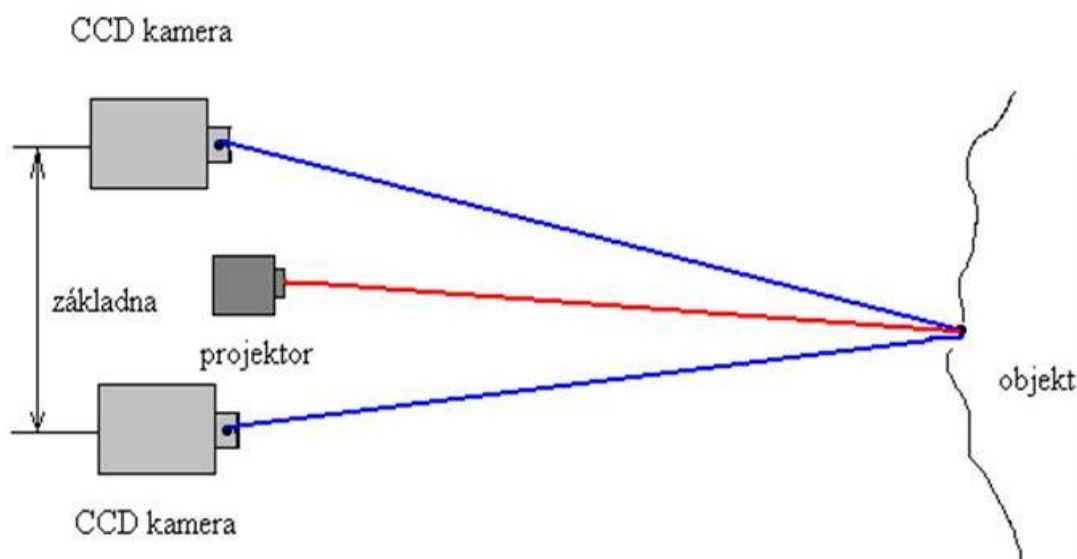
Triangulační skenery neboli skenery se základnou, využívají pro výpočet určované vzdálenosti triangulační metody; využívají laserové pohyblivé ukazovátko, digitální kameru pro záznam stopy laseru na objektu. Vzdálenost se vypočte pomocí kosinové věty ze známých proměnných v trojúhelníku, jehož vrcholy tvoří zdroj světla, projekční centrum kamery a pozorovaný bod, označený laserem. Proměnnými v trojúhelníku jsou tedy úhel letu laserového paprsku, směr pozorování, daný snímkovou souřadnicí a délka základny. Souřadnice jsou tedy určovány na základě protínání vpřed z úhlů.

S rostoucí délkou základny klesá přesnost této metody. Proto je tato metoda vhodná na krátké vzdálenosti, kde však dosahuje vysoké přesnosti.

U skenerů se základnou se používá dvou systémů, jednokamerového a dvoukamerového. Princip výpočtu souřadnic funguje u obou na základě protínání z úhlů. Tyto systémy jsou zobrazeny na obrázcích 3 a 4.



Obr. 3: Skener se základnou – jednokamerový (Štroner, 2013)



Obr. 4: Skener se základnou – dvoukamerový (Štroner, 2013)

2.1.2.2. Time of flight skenery

U skenerů používajících systém *time-of-flight* je způsob určování délek založen na měření transitního času, který potřebuje elektromagnetický impuls k projití dvojnásobku určované délky. Vysílač dálkoměru vyšle impuls (laserový paprsek), čímž se zároveň spustí elektronické měření času. Paprsek se odrazí od objektu, vrací se a dopadá na přijímač dálkoměru, což ukončí měření času.



Ze známé rychlosti šíření užitého elektromagnetického záření (světla) daným prostředím pak lze určit měřenou vzdálenost pomocí jednoduchého fyzikálního vzorce pro výpočet dráhy jako násobek rychlosti a času. Dráha je v tomto případě dvojnásobkem určované délky a rychlost se vypočte jako podíl rychlosti šíření elektromagnetické vlny ve vakuu a indexu lomu prostředí.

Vzhledem k rychlosti šíření elektromagnetických vln je transitní čas velmi malý, proto jsou kladeny vysoké nároky na přesnost měření transitního času.

2.1.2.3. Fázové skenery

U skenerů používajících fázové určení délky je vzdálenost určována pomocí fázového rozdílu, který vzniká mezi vyslaným a přijatým signálem.

Pro vlastní měření je podmínkou, že vyslaný signál musí být amplitudově modulovaný. Amplitudově modulovaná vlna o dané fázi může být vyslána a od objektu se vrátí odražená vlna o rozdílné fázi. Fázoměr je poté schopen určit rozdíl mezi vyslanou a přijatou fází. Tím by nebyla vzdálenost jednoznačně určena, neboť počet celých vln není znám. Z toho plyne další podmínka, že vlna musí být delší, než je určovaná vzdálenost.

Nevýhodou takto fungujících skenerů je omezení dosahu na délku amplitudově modulované vlny.

2.1.3. Optické skenování

Optické skenování bývá také označováno zkratkou IBMR z anglického *Image Based Modelling and Rendering*. Touto problematikou se zabývá například *Pavelka a kol. (2017)* nebo ze zahraničních zdrojů *Brown (2005)*.

Zařazení obecně mezi skenery je problematické, zařízení pro sběr dat – digitální kamera – není principiálně skener, nemá skenující jednotku. Výsledkem je ale mračno bodů, jako u jiných 3D skenerů; je ale možno říci, že skenování se provádí ručně a v matici bodů, tj. vlastní proces fotografování. U optického skenování data nejsou přímo skenována pomocí skenerů, nýbrž, jak anglická zkratka nápadně vypovídá, jsou



pořizovány fotografie, které jsou následně fotogrammetricky zpracovány pomocí příslušného software do podoby bodového mračna.

Aby software byl schopen provést obrazovou korelaci a vygenerovat bodové mračno, snímky musí být pořizovány s dostatečným překrytem (60% až 70%) a v dobré kvalitě. Proto jsou kladeny vysoké nároky na použitou digitální kameru. Tato data mohou být zpracována například pomocí software Agisoft Photoscan, Insight3D, Photomodeler nebo 3DF Zephyr. Zpracováním těchto dat se zabýval například *Šedina (2012)* ve své diplomové práci, kde byly pro zpracování použity programy VisualSFM, Agisoft Photoscan a Photomodeler.

Porovnáním dat pořízených pomocí laserového skenování a IMBR se zabývá *Pavelka a kol. (2017)*, kde byl pro testování použit laserový skener Surphaser s přesností 0,6 mm na 10 metrů. Výsledky porovnání v software CloudCompare ukazují, že rozdíl mezi těmito technologiemi je velmi malý, maximálně 2 mm.



3. Zpracování dat 3D laserového skenování

Na rozdíl od klasické geodézie, kde dochází k výběru prvků zájmu již při měření, laserové skenování je metodou neselektivní, proto je vhodné naskenovaná data před samotným zpracováním upravit tak, aby se zamezilo zpracování chybných nebo nepotřebných bodů. Vznik chybných bodů může být způsoben odrazem v prostoru mezi objektem a skenerem, například od procházejících lidí, padajícího prachu nebo deště. Dále je vhodné odstranit nepotřebná data, jako jsou naskenované oblasti mimo zájmový objekt nebo body příliš vzdálené, které jsou již naskenovány s nižší přesností. Dále je možné provést redukci dat, která je užitečná například v těch částech bodového mráčka, které byly blízko stanoviště, a tudíž jsou naskenovány s vyšší (někdy až příliš vysokou) přesností než vzdálenější objekty. Pokud by tyto úpravy provedeny nebyly, mohlo by to značně zpomalit proces zpracování dat, neboť bychom pracovali s příliš objemnými daty. Avšak úpravy musí být provedeny s rozvahou, neboť pro spojování jednotlivých skenů do jednoho celku je v některých případech zapotřebí překrytů. (*Štroner, 2013*)

Po provedení vstupních úprav je nutné provést registraci dat, resp. spojit mráčka bodů z jednotlivých stanovišť do jednoho homogenního mráčka. Některé přístroje jsou schopny data registrovat automaticky, resp. poloautomaticky, na základě dostatečného překrytí dat a IMU jednotky zabudované v přístroji, této problematice je dále věnována část kapitoly 4 „Testování laserového skeneru BLK360“. Manuální registrace může být provedena buď pomocí vlíčovacích bodů, nebo na základě překrytí. V obou případech je provedena prostorová transformace jednotlivých skenů do společného místního souřadnicového systému. Postupem transformace souřadnic v prostoru se zabývá *Štroner (2013)*.

Dále mohou být data georeferencována do požadovaného souřadnicového systému pomocí vlíčovacích bodů, jejichž souřadnice jsou určeny geodetickou metodou pomocí totální stanice nebo GNSS.

Před dalším zpracováním bodového mráčka například do podoby vektorového 3D modelu je vhodné data opět upravit a odstranit nadbytečné body (oblasti), resp. ponechat pouze zájmový objekt.



Následně může být z bodového mračna vytvořen kompletní 3D model nebo ve specifických případech může být dostačující pouze část objektu, jednotlivé plochy nebo linie, s ohledem na požadavky zadavatele a účel modelu.

Problematikou zpracování dat 3D laserového skenování se zabývá také *Kocáb (2016)* nebo z anglicky psaných zdrojů například *Murphy (2006)*.

3.1. Software pro zpracování dat 3D laserového skenování

V této kapitole jsou nastíněny některé z dostupných softwarových možností pro zpracování dat laserového skenování. Kapitola je rozdělena na tři podkapitoly. První podkapitola pojednává o programech umožňující prohlížení mračen bodů, druhá se zabývá programy pro samotné prvotní zpracování a registraci bodových mračen pořízených přímo při skenování. Třetí podkapitola je souhrnem programů použitelných k následnému zpracování bodového mračna a tvorbu vektorového 3D modelu.

3.1.1. Prohlížeče mračen bodů

Obecně řečeno slouží prohlížeče bodových mračen pro vizualizaci a prezentaci bodových mračen bez možnosti data editovat. *Pavelka (2014)* uvádí některé z dostupných prohlížečů i se stručným popisem jejich možností.

Dalším příkladem je TruView Global od společnosti Leica Geosystems, jehož výhodou je možnost přístupu k datům bez instalace programu, informace jsou přímo dostupné v internetovém prohlížeči. Uživatelé mohou data prohlížet, přibližovat, mohou v nich také měřit a dělat poznámky.

3.1.2. Software pro registraci dat

Pro zpracování dat 3D laserového skenování si může uživatel vybrat z poměrně široké nabídky softwarů, avšak ne z volně dostupných. Za účelem kompatibility a správného fungování programu je obecně nejvhodnější vybírat software na základě použitého přístroje pro měření. Pokud byl pro měření použit například přístroj od společnosti Leica, je vhodné použít i software pro zpracování od stejné společnosti. Tím



by měla být zajištěna maximální kompatibilita a nemělo by docházet k nechtěnému ředění dat.

Jednou z možností je Trimble Real Works od společnosti Trimble, který použil pro zpracování dat 3D laserového skenování například *Kocáb (2016)*.

Dalším z rozšířených softwarů pro zpracování dat laserového skenování je Cyclone vyvíjený společností Leica Geosystems. Tento software byl zvolen pro registraci dat v této diplomové práci a princip tohoto zpracování je uveden dále v kapitole „Testování laserového skeneru BLK360“, kde je postup popsán na konkrétních příkladech testovaných dat. Tento software by také mohl být použit pro vektorizaci bodového mračna.

Nicméně na trhu jsou dostupné i programy, které nejsou vyvíjeny přímo společnostmi zabývajícími se výrobou a vývojem laserových skenerů. Mezi takové patří například ReCap od společnosti Autodesk, který byl použit i pro zpracování části této diplomové práce.

O dalších softwarových možnostech se zmiňuje *Pavelka (2014)*.

3.1.3. Software pro tvorbu 3D modelu

Za účelem lepší vizualizace a prezentace dat 3D laserového skenování bývá někdy bodové mračno vektorizováno do podoby vektorového 3D modelu. Skupiny bodů jsou pomocí softwarových funkcí aproximovány liniemi, plochami a tělesy, čímž mohou být tvary zájmového objektu přehledněji vystihnuty.

Touto problematikou se zabývá *Nesrstová (2016)* ve své bakalářské práci, kde byl kladen důraz na průběh, a především průhyb, jednotlivých trámů roubené usedlosti. Práce byla zpracována v software MicroStation od společnosti Bentley Systems a její součástí je také podrobný popis samotného modelování.

Alternativou pro vektorizaci dat 3D laserového skenování by mohl být software AutoCAD nebo SketchUp.

4. Testování laserového skeneru BLK360

Hlavním předmětem této diplomové práce bylo testování laserového skeneru Leica BLK360, který byl zapůjčen z firmy Gefos a.s.

Na obrázku 4 je vyobrazen zmiňovaný laserový skener s tabletem Apple iPad Pro, kterým je možno skener bezdrátově ovládat.



Obr. 4: 3D laserový skener Leica BLK360 s tabletem Apple iPad Pro, (www.leica-geosystems.com)

Laserový skener BLK360 skenuje plné zorné pole, tedy 360° horizontálně a 300° vertikálně, v dosahu do 60 metrů. Přístroj nabízí možnost pořízení panoramatické fotografie i s volbou HDR barev a dále například tři stupně kvality rozlišení (vysoké, střední, nízké). Doba jednoho měření na stanovisku trvá cca 3 až 8 minut s ohledem na zvolené parametry. Dále je vybaven IMU jednotkou, která umožňuje automatickou orientaci přístroje. Výrobce udává, že IMU jednotka by měla být funkční do maximálního vychýlení 5° od vertikály. Testovaný přístroj je ve své kategorii unikátní především svými rozměry, váhou a rychlostí skenování. Jeho technické parametry jsou popsány v tabulce 1 a byly převzaty z www.leica-geosystems.com.



Tabulka 1: Technické parametry laserového skeneru Leica BLK360

Všeobecná specifikace		
Rozměry	Výška	165 mm
	Průměr	100 mm
Váha		1 kg
3D skenování		
Zorné pole		360° Hz x 300° V
Rozsah		0,6 m až 60 m
Rychlost skenování		max. 360 000 bodů za sekundu
Délková přesnost		4 mm @ 10 m, 7 mm @ 20 m
3D přesnost		6 mm @ 10 m, 8 mm @ 20 m
Pořizování obrazových informací		
Kamerový systém		15 MPix 3-kamerový systém, 150 MPix panorama, HDR, LED blesk, 360° x 300°
Termální kamera		Dlouhovlnná IR kamera, 360° x 70°

Skenování může být provedeno buď stisknutím tlačítka na skeneru, nebo pomocí aplikace na tabletu Apple iPad Pro, který byl od společnosti Gefos zapůjčen společně s přístrojem.

Při skenování pomocí tlačítka jsou data ukládána přímo do skeneru. Skener je poté propojen s počítačem pomocí WLAN a data jsou exportována. Následná registrace pak může být provedena pomocí software Cyclone nebo Cyclone REGISTER 360, ve kterých mohou být skeny spojeny přes vazbu *cloud-to-cloud* nebo pomocí terčů.

Při použití tabletu je iPad Pro pomocí WLAN připojen ke skeneru a skener je tak ovládán přímo z tabletu. K tomu slouží předinstalovaná aplikace ReCap Pro od společnosti Autodesk, kde se spouští samotné skenování, dále mohou být vytvářeny projekty, měněny parametry skenování a registrována data. Data jsou ukládána přímo do tabletu, odkud jsou do PC přenášeny pomocí kabelu USB.

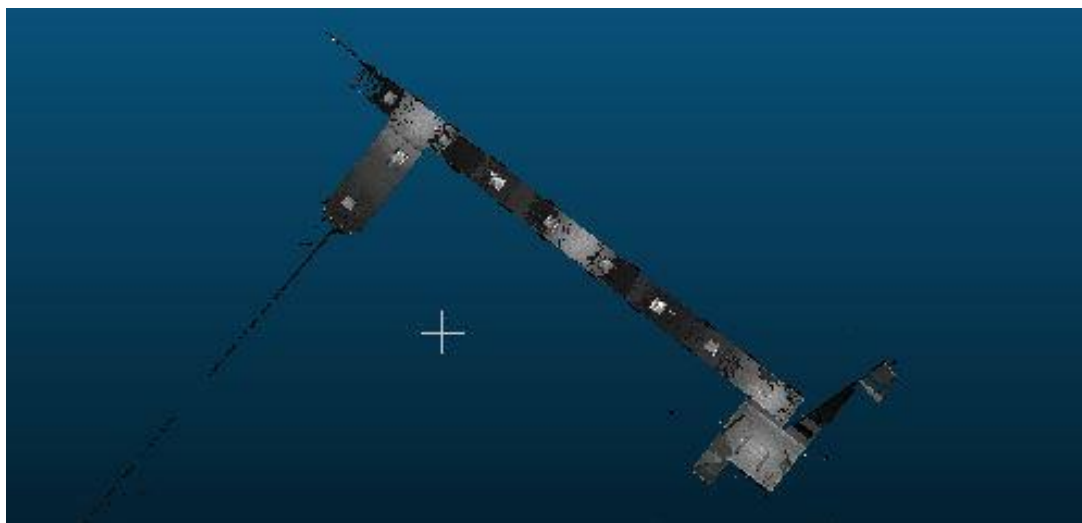
4.1. Automatická registrace mračen

V této kapitole je popsán postup testování automatické registrace mračen pomocí aplikace ReCap Pro, která byla prováděna přímo v tabletu během měření.

4.1.1. Popis experimentu

Test byl proveden tak, že ve vybrané oblasti bylo naskenováno bodové mračno z minimálně tří stanovisek. Tyto skeny byly registrovány přímo během měření v aplikaci ReCap Pro a následně exportovány do počítače jako jedno bodové mračno. Zároveň byly exportovány skeny z jednotlivých stanovisek, které byly registrovány pomocí software Cyclone. Takto registrovaná mračna byla porovnána v software CloudCompare.

K testu byly použity tři geometricky a morfologicky odlišná místa. Prvním z nich byla rovinná chodba. Dalším prvkem bylo schodiště, kde bylo, na rozdíl od chodby, různé i převýšení. Skenována byla tři podlaží s pěti stanovisky tak, aby byla stanoviska i v mezipatrech a docházelo tak k dostatečnému překrytu. Posledním testovaným územím byla socha kardinála Berana, která se nachází v exteriéru poblíž FSv ČVUT v Praze. Na rozdíl od předchozích objektů nemá geometricky pravidelný tvar. Jednotlivé situace jsou znázorněny na následujících obrázcích ve formě bodových mračen.



Obr. 5: Chodba zobrazená ve formě bodového mračna



Obr. 6: Schodiště ve formě bodového mračka



Obr. 7: Socha kardinála Berana ve formě bodového mračka



4.1.2. Postup měření

Měření bylo prováděno pomocí tabletu iPad Pro, ve kterém bylo nastaveno střední rozlišení pro skenování chodby i schodů. Pro skenování sochy kardinála Berana bylo nastaveno plné rozlišení a pořizování snímků v HDR barvách. Stanoviska byla ve všech případech rozvržena tak, aby docházelo k dostatečným překrytům na sousedních snímcích a aby byl prostor skenován s co nejmenším počtem slepých míst. Při umísťování přístroje na jednotlivá stanoviska bylo dbáno na hrubou horizontaci přístroje. Vzhledem k tomu, že použitý skener není vybaven libelou, horizontace musela být provedena pouze „od oka“. V interiérech, kde je podlaha považována za rovnou, je tento odhad horizontace snazší než v exteriéru, kde nerovnosti terénu situaci často zkreslují.

Samotné měření na stanovisku bylo vždy ovládáno z tabletu. Po zahájení nového skenování nejprve přístroj zkontroluje, zda měření může být provedeno (například že se žádné předměty nenachází v bezprostřední blízkosti), poté jsou pořízeny fotografie v rozsahu celého zorného pole a následně je tento prostor naskenován. Konec procesu je znázorněn zeleně svítícím pruhem na přístroji nebo přímo oznámen v aplikaci RaCap Pro.

4.1.3. Postup zpracování

4.1.3.1. Registrace mračen v aplikaci ReCap Pro

Registrace mračen v aplikaci ReCap Pro probíhala přímo při měření. Poté, co byla změřena dvě stanoviska, byl přístroj přemístěn na třetí stanovisko, kde bylo zahájeno další skenování. Během tohoto skenování mohla být předchozí stanoviska registrována. Aplikace provede automatickou registraci a zobrazí její stav, přesnost, překryt a grafický náhled. Dále ohlásí, že je potřeba provést kontrolu registrace a sloučit skeny. V případě, že přesnost automaticky provedené registrace je příliš nízká, může být registrace zpřesněna pomocí tří identických bodů. Při této volbě jsou identické body vyhledávány a označovány na panoramatických snímcích sousedních stanovisek. Proces je dokončen stisknutím tlačítka „Merge“, čímž se potvrdí registrace a sloučí skeny.



Tento postup byl zopakován po naskenování každého dalšího stanoviška. Při větším počtu stanovišek mohlo být pro registraci nového skenu zvoleno kterékoli z předchozích stanovišek.

Při měření chodby byla automatická registrace vypočtena s dostatečnou přesností i bez použití identických bodů. Pro registraci schodů musely být označeny identické body, neboť aplikace ReCap nedokázala registraci s takovými výškovými rozdíly provést. Při skenování sochy kardinála Berana byla data registrována automaticky, avšak pro některá stanoviška s nízkou přesností, proto byla v těchto případech registrace zpřesněna pomocí identických bodů.

4.1.3.2. Registrace mračen v software Cyclone

Po měření byla data exportována přímo z přístroje do databáze pomocí software Leica Cyclone. Skeny z jednotlivých stanovišek byly v tomto případě exportovány zvlášť.

V databázi Cyclone byla vytvořena registrace, do které byly po spuštění nahrány potřebné skeny. Program automaticky zvolí jeden sken jako referenční, k němuž jsou postupně ostatní skeny připojovány. Vždy byla prováděna registrace pouze dvou skenů. Postupným připojováním dalších skenů pak bylo vytvořeno jedno kompletní mračno.

Pro všechny testované oblasti byla použita registrace vizuální („Visual Alignment“), při které jsou skeny k sobě zarovnávány ručně. U interiérů, které jsou geometricky poměrně pravidelné, bylo snadné skeny uzpůsobit tak, aby na sebe pasovaly, a takto provedená registrace byla dostačující k tomu, aby odchylky byly po výpočtu registrace menší než 1 cm. Pro měřené venkovní území se sochou kardinála Berana tento postup dostačující nebyl. Proto byly pro registraci zvoleny pomocné identické body, přičemž na každých dvou skenech ze sousedních stanovišek musely být shodné alespoň 3 body. Po výpočtu registrace byly některé vazby, u kterých docházelo k největším odchylkám, deaktivovány, aby nebyly do výpočtu zahrnuty, a výpočet byl proveden znovu.



4.1.3.3. Porovnání mračen v CloudCompare

Po importu dat do programu CloudCompare byly jednotlivé skeny spojeny tak, aby v jednom bodovém mračnu byly obsaženy skeny ze všech stanovisek. Toto spojení bylo provedeno zvlášť pro skeny registrované v software Cyclone a ReCap Pro. Spojení skenů z jednotlivých stanovisek mohlo být provedeno i v software Cyclone. Tato volba byla prakticky zvolena obzvlášť pro mračna, která již byla v software Cyclone registrována. Pro automaticky registrovaná mračna v software ReCap Pro bylo spojení provedeno až v CloudCompare, díky čemuž nemusela být tato data do programu Cyclone vůbec načítána.

V případě chodby a schodů byla naskenovaná data příliš objemná, proto byla pro účely dalšího zpracování nejprve zředěna a ořezána. Objem dat před a po zředění je porovnán v tabulce 2, tabulka 3 srovnává počty bodů obsažených v jednotlivých souborech před a po zředění/ořezání. Pro názornost jsou do tabulek zahrnuta i data sochy kardinála Berana, u kterého byl proveden pouze ořez.

Tabulka 2: Porovnání objemu dat před a po zředění/ořezání

Objem dat	Cyclone		ReCap Pro	
	Před [GB]	Po [GB]	Před [GB]	Po [GB]
Chodba	5,5	2,0	4,8	2,0
Schody	1,4	0,5	1,2	0,8
Socha kardinála Berana	1,4	0,3	0,9	0,3

Tabulka 3: Porovnání počtu bodů před a po zředění/ořezání dat

Počet bodů	Cyclone		ReCap Pro	
	Před	Po	Před	Po
Chodba	233 162 301	129 831 765	241 107 768	110 088 188
Schody	57 144 648	34 280 625	60 157 460	45 309 041
Socha kardinála Berana	20 664 104	19 616 027	24 516 636	13 776 354

Objem mračna a počet bodů pro skeny u sochy kardinála Berana jsou značně menší než v případě chodby a schodů. To bylo způsobeno tím, že data byla ořezána již po registraci v software Cyclone, protože při měření v exteriéru dochází k naskenování značného počtu bodů mimo zájmový objekt.



Po úpravě jednotlivých mračen ze Cyclone a ReCap zvlášť mohla být načtena obě do CloudCompare, kde byla provedena transformace jednoho z mračen do místního souřadnicového systému druhého mračna. Jako referenční bylo vždy zvoleno mračno registrované v software Cyclone.

Pro porovnání mračen v software CloudCompare bylo opět jako referenční mračno zvoleno to, které bylo registrováno v software Leica Cyclone. Určovány byly absolutní vzdálenosti mračna spojeného pomocí automatické registrace v software ReCap Pro provedené přímo při měření od referenčního mračna.

Tato porovnání stejných dat, která byla zpracována dvěma různými technologiemi – manuálně v Cyclone, automaticky v ReCap Pro, nevypovídají o absolutní přesnosti zařízení. K tomu je třeba například jiné nezávislé měření. Proto bylo provedeno porovnání relativních vzdáleností skenů automaticky a ručně registrovaných od skenů z přesnějšího přístroje. Tento experiment je popsán v kapitole 4.1.5.

4.1.4. Analýza výsledků

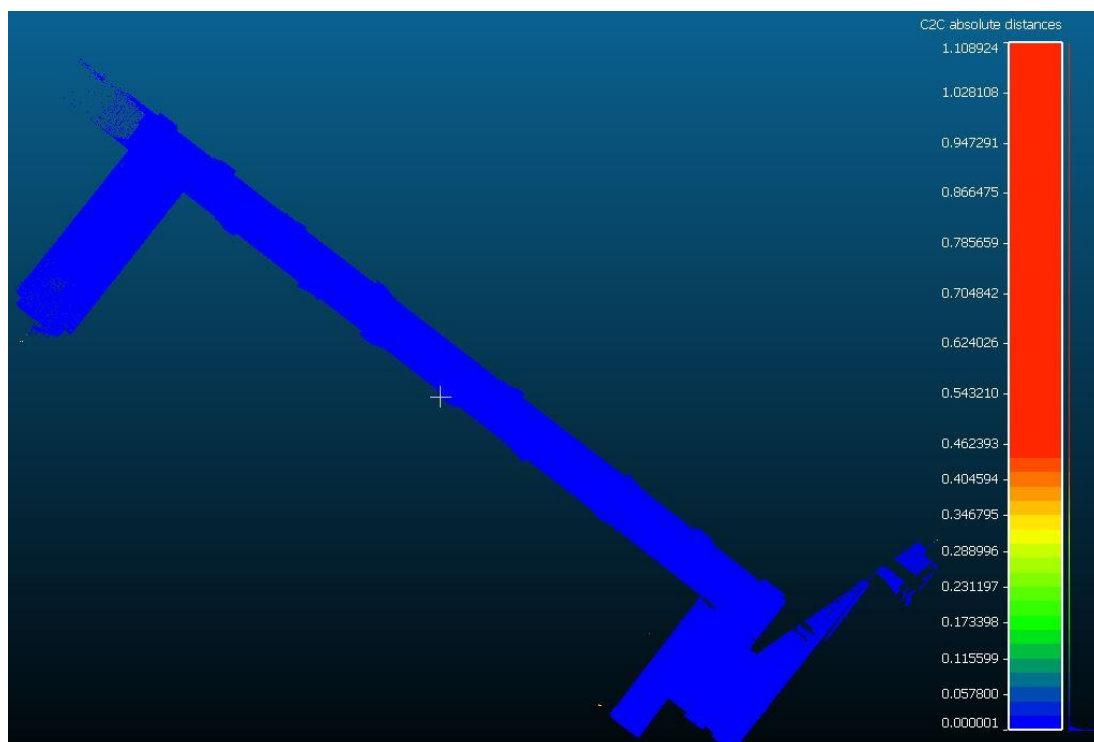
Chodba:

Před výpočtem absolutních vzdáleností software CloudCompare automaticky vypočte přibližné hodnoty. Tyto hodnoty pak byly použity pro samotný výpočet jako jeho parametry.

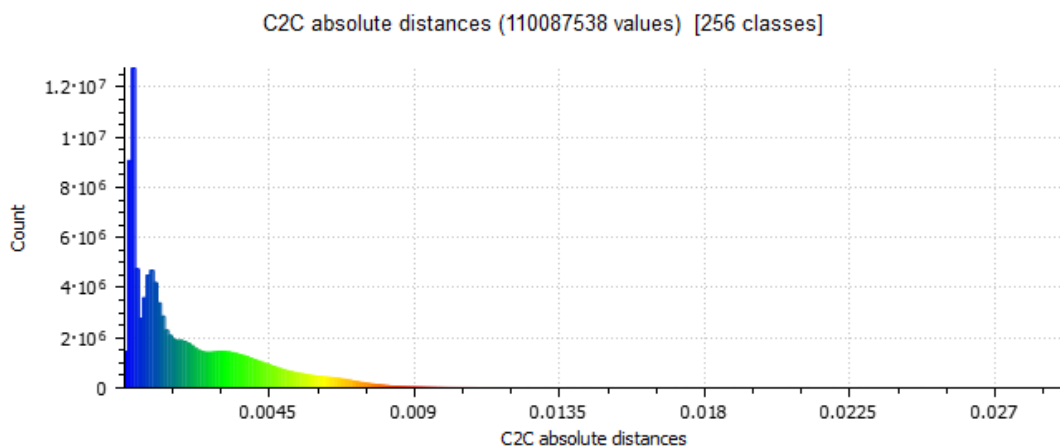
1	Min dist.	0
2	Max dist.	1.08352
3	Avg dist.	1.62126e-5
4	Sigma	0.00199931
5	Max error	0.121141

Obr. 8: Přibližné výsledky výpočtu absolutních vzdáleností, uvedené v metrech

Chodba byla skenována s velkým překrytem, což přispělo k vysoké přesnosti registrace dat, jak je patrné ze zobrazení pomocí hypsometrických barev a histogramu. Absolutní vzdálenosti dvou odlišně registrovaných mračen se pohybovala v řádech milimetrů, 80 % dat se nelišilo více než o 5 mm.



Obr. 9: Porovnání dvou mračen – hypsometrická škála



Obr. 10: Porovnání dvou mračen – histogram – na vertikální ose je počet bodů, na horizontální ose je absolutní vzdálenost dvou mračen v metrech

Tabulka 4: Výsledné hodnoty výpočtu absolutních vzdáleností

Průměrná vzdálenost [m]	0,002049
Směrodatná odchylka [m]	0,002109
Doba trvání výpočtu [s]	330,13



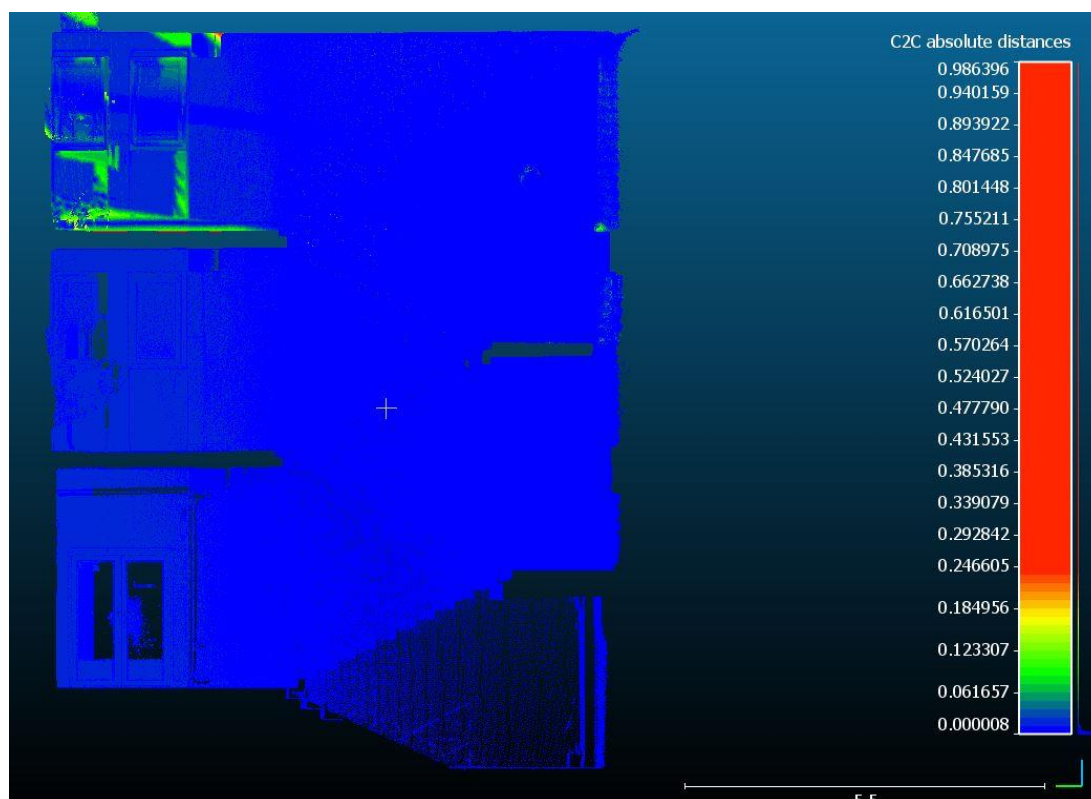
Schody:

Parametry použité pro výpočet absolutních vzdáleností dvou mračen byly převzaty z aproximovaných výsledků vypočtených automaticky softwarem CloudCompare. Tyto hodnoty jsou na obrázku 11.

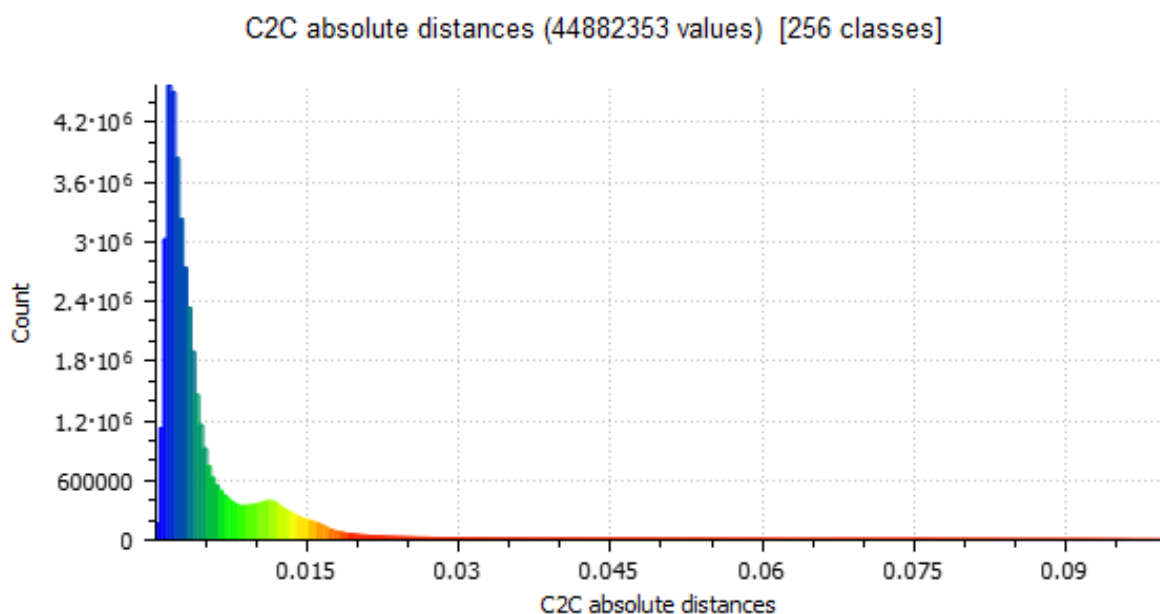
1	Min dist.	0
2	Max dist.	0.921647
3	Avg dist.	0.00424582
4	Sigma	0.0232106
5	Max error	0.057603

Obr. 11: Přibližné výsledky výpočtu absolutních vzdáleností, uvedené v metrech

Při porovnání bodových mračen schodů byly zjištěny větší odchylky než u přechozí situace, nicméně průměrná vzdálenost nepřekračuje hodnotu 1 cm, což například pro stavební účely může být dostačující.



Obr. 12: Porovnání dvou mračen – hypsometrická škála



Obr. 13: Porovnání dvou mračen – histogram – na vertikální ose je počet bodů, na horizontální ose je absolutní vzdálenost dvou mračen v metrech

Pro lepší přehlednost byla v histogramu zobrazena jen data ve vzdálenosti od 0 do 0,1 metru.

Tabulka 5: Výsledné hodnoty výpočtu absolutních vzdáleností

Průměrná vzdálenost [m]	0,008772
Směrodatná odchylka [m]	0,020283
Doba trvání výpočtu [s]	863,45



Socha kardinála Berana:

Tabulka 6: Výsledky registrace sochy kardinála Berana v Cyclone

Constraint ID		Stanovisko	Stanovisko	Typ vazby	Status	Error [m]
Mračno	Cloud 1	1	2	Cloud – Cloud	On	0.007
	Cloud 2	2	3	Cloud – Cloud	On	0.005
	Cloud 3	3	4	Cloud – Cloud	On	0.001
Číslo identického bodu	5	1	2	Bod – bod	On	0.003
	7	1	3	Bod – bod	On	0.003
	7	1	4	Bod – bod	On	0.004
	4	1	2	Bod – bod	Off	0.018
	1	1	4	Bod – bod	Off	0.013
	2	1	4	Bod – bod	On	0.004
	3	1	2	Bod – bod	On	0.004
	3	1	3	Bod – bod	On	0.003
	8	1	4	Bod – bod	Off	0.018
	6	2	3	Bod – bod	On	0.004
	3	2	3	Bod – bod	On	0.002
	7	3	4	Bod – bod	On	0.002

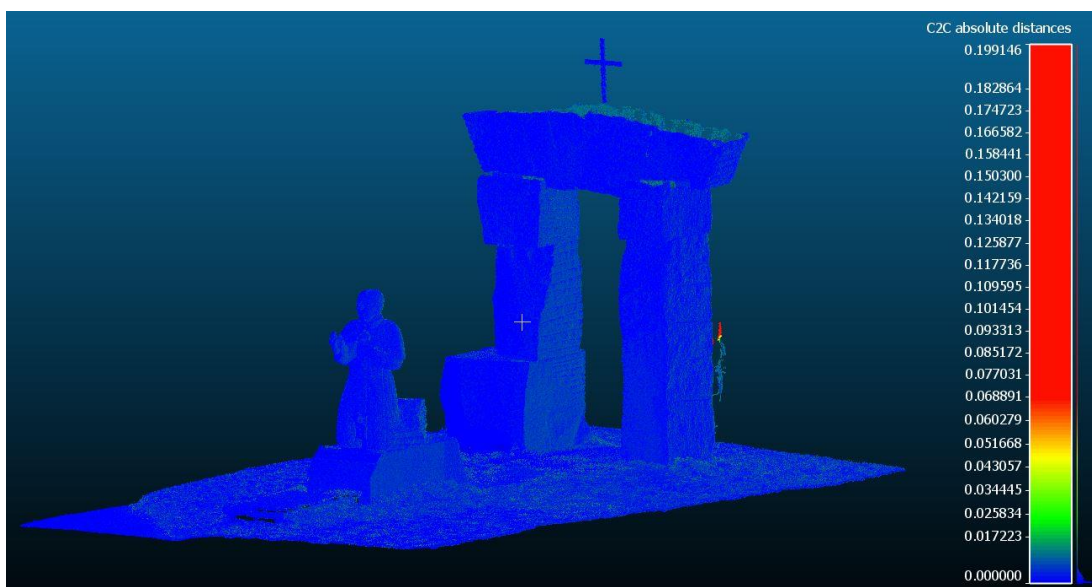
V tabulce 6 jsou uvedeny chyby při registraci provedené v software Cyclone. Při výpočtu byly u některých vazeb zjištěny chyby přesahující 1 cm. Proto tyto vazby byly deaktivovány a tím vyřazeny z výpočtu.

Než byl proveden výpočet absolutních vzdáleností, software CloudCompare vypočítá přibližné hodnoty, ty jsou zaznamenány na obrázku 14. Tyto parametry pak byly použity pro samotný výpočet absolutních vzdáleností.

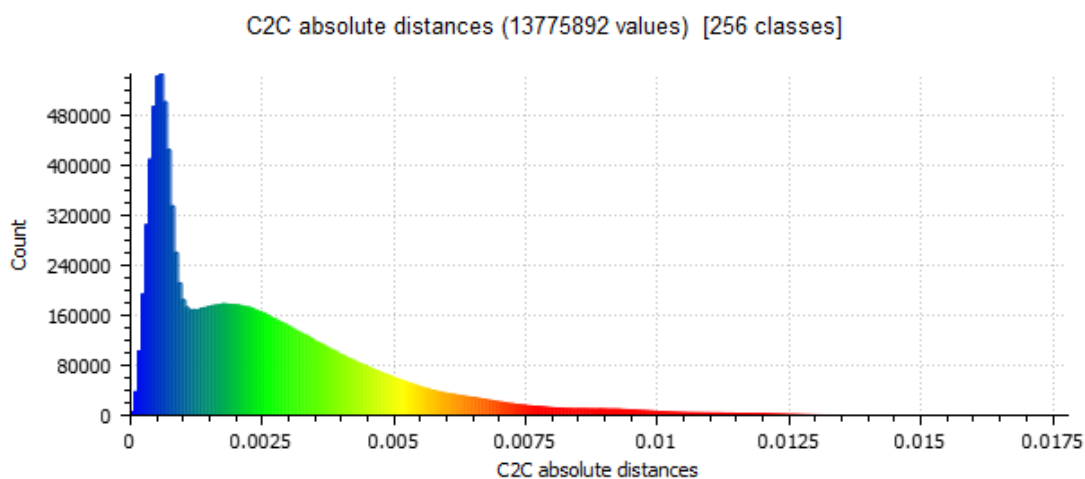
1	Min dist.	0
2	Max dist.	0.195095
3	Avg dist.	3.33599e-5
4	Sigma	0.00173202
5	Max error	0.0436246

Obr. 14: Přibližné výsledky výpočtu absolutních vzdáleností, uvedené v metrech

Po provedení výpočtu absolutních vzdáleností dvou mračen byly výsledné hodnoty zobrazeny ve formě hypsometrických barev, což je zobrazeno na obrázku 15.



Obr. 15: Porovnání dvou mračen – hypsometrická škála



Obr. 16: Porovnání dvou mračen – histogram – na vertikální ose je počet bodů, na horizontální ose je absolutní vzdálenost dvou mračen v metrech

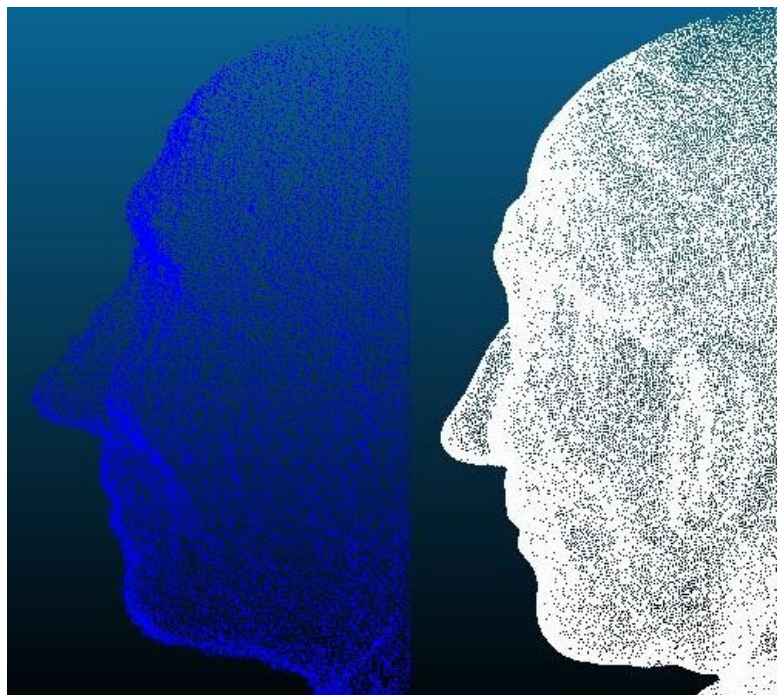
Z obrázku a z histogramu vyplývá, že jen málo dat, v řádech několika tisíců bodů, překročilo odchylku 1 cm. Za portálem nacházejícím se za sochou kardinála Berana je vidět oblast s červeně obarvenými body, což značí absolutní vzdálenost větší než 7 cm, jak je patrné z hypsometrické škály. To bylo způsobeno průchodem osoby při měření. Body na horní straně portálu byly naskenovány s nižší přesností, proto při registraci vznikaly větší odchylky, okolo 2 cm.

Tabulka 7: Výsledné hodnoty výpočtu absolutních vzdáleností

Průměrná vzdálenost [m]	0,002518
Směrodatná odchylka [m]	0,002245
Doba trvání výpočtu [s]	543,40

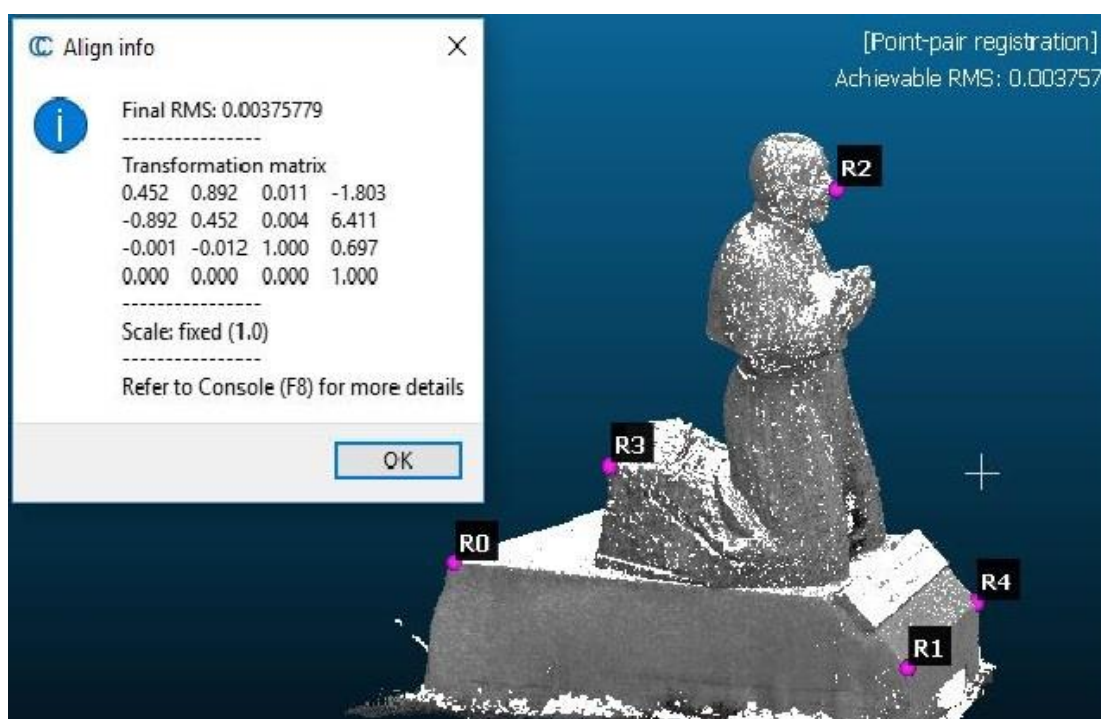
4.1.5. Porovnání relativních vzdáleností od mračna získaného pomocí skeneru Surphaser 25HSX

Výchozími daty pro tento pokus byly skeny sochy kardinála Berana, které byly zvlášť registrovány pomocí software ReCap Pro (automaticky) a Leica Cyclone (ručně). Aby mohla být zhodnocena přesnost automatické registrace, byla obě mračna porovnána s bodovým mračnem získaným pomocí skeneru Surphaser 25HSX. Skeny pořízené tímto laserovým skenerem byly zapůjčeny na katedře geomatiky. Na rozdíl od Leica BLK360, který dosahuje délkové přesnosti 6 mm na 10 m, může Surphaser 25HSX dosáhnout přesnosti až 0,6 mm na 10 m. O řád vyšší přesnost je patrná již po načtení skenů do programu CloudCompare, jak je vidět na obrázku 17. Bodové mračno získané pomocí skeneru Surphaser (vpravo) je již na první pohled přesnější, body tvoří jasnou spojitou linii obličeje kardinála Berana.



Obr. 17: Porovnání skenů – BLK360 (vlevo) a Surphaser (vpravo)

Do programu CloudCompare byla načtena tři bodová mračna – skeny ze Surphaseru, skeny z BLK360 registrované v ReCap Pro a skeny z BLK360 registrované v Cyclone. Poté byla provedena ruční transformace těchto bodových mračen do stejného místního souřadnicového systému tak, aby se mračna překrývala a mohla být následně porovnána. Volba identických bodů při transformaci a transformační matice jsou zobrazeny na obrázku 18. Odchyly vzniklé mezi jednotlivými identickými body jsou zaznamenány na obrázku 19.



Obr. 18: Volba identických bodů při transformaci



<input checked="" type="checkbox"/> show 'to align' cloud								$r = 20.000$	$RMS < 10\%$
	X	Y	Z	Error					
A0	1.466128	-1.390180	-1.167397	0.00502351					
A1	3.166228	-0.210248	-1.409804	0.00454448					
A2	2.546209	-0.134133	0.472044	0.00357501					
A3	1.979248	-0.934100	-0.708355	0.00294597					
A4	2.668769	0.524545	-1.385037	0.00180483					

<input checked="" type="checkbox"/> show 'reference' cloud									
	X	Y	Z	Error					
R0	-2.396950	4.473370	-0.458040	0.00502351					
R1	-0.570770	3.486490	-0.713500	0.00454448					
R2	-0.763360	4.080750	1.168450	0.00357501					
R3	-1.752340	4.219940	-0.002830	0.00294597					
R4	-0.145670	4.261540	-0.698830	0.00180483					

☐ adjust scale

Rotation XYZ ☒ Tx ☒ Ty ☒ Tz

☒ auto update zoom

align reset

Obr. 19: Chyby na jednotlivých identických bodech

Byl proveden dvojí výpočet vzdáleností metodou Cloud to Cloud. Nejprve byly vypočteny absolutní vzdálenosti mračna získaného ruční registrací pomocí software Cyclone od mračna naskenovaného Surphaserem. Poté bylo proveden výpočet absolutních vzdáleností mračna automaticky registrovaného v software ReCap Pro od mračna naskenovaného Surphaserem. Výsledky těchto dvou výpočtů jsou porovnány níže. Tímto porovnáním byla zhodnocena kvalita automatické registrace pomocí ReCao Pro v porovnání s kvalitou ruční registrace pomocí Cyclone.

Před samotnými výpočty vzdáleností metodou Cloud to Cloud software vypočte přibližné výsledky. Tyto hodnoty pro ruční a automatickou registraci jsou zachyceny na obrázcích 20 a 21. Tyto hodnoty byly použity jako vstupní parametry pro samotné výpočty absolutních vzdáleností.

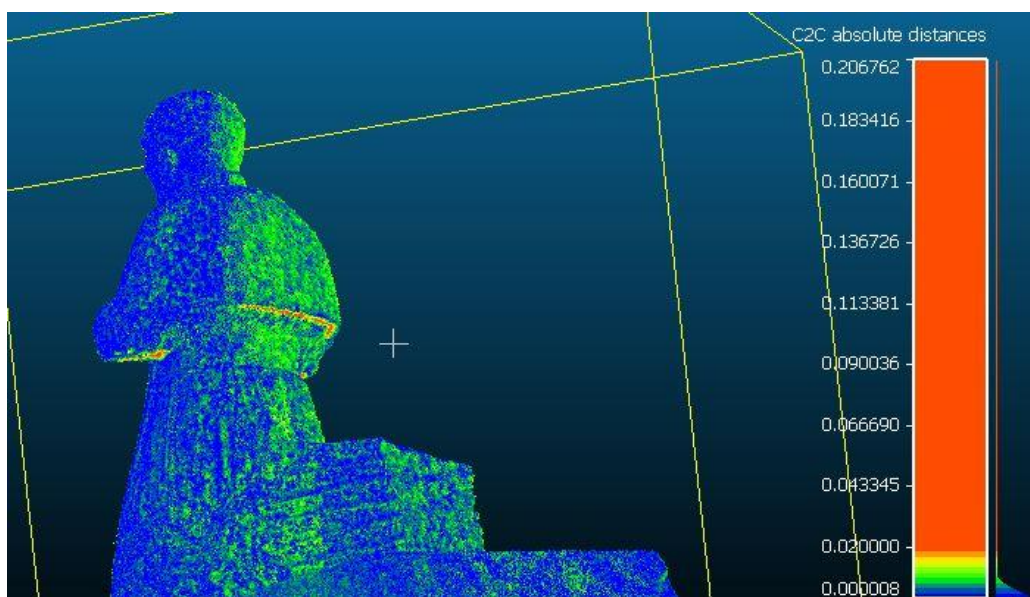
1	Min dist.	0
2	Max dist.	0.194015
3	Avg dist.	0.00360935
4	Sigma	0.0104878
5	Max error	0.0100592

Obr. 20: Přibližné výsledky výpočtu absolutních vzdáleností mračna ze Surphaseru od mračna z BLK360 registrovaného ručně v Cyclone; hodnoty jsou uvedeny v metrech

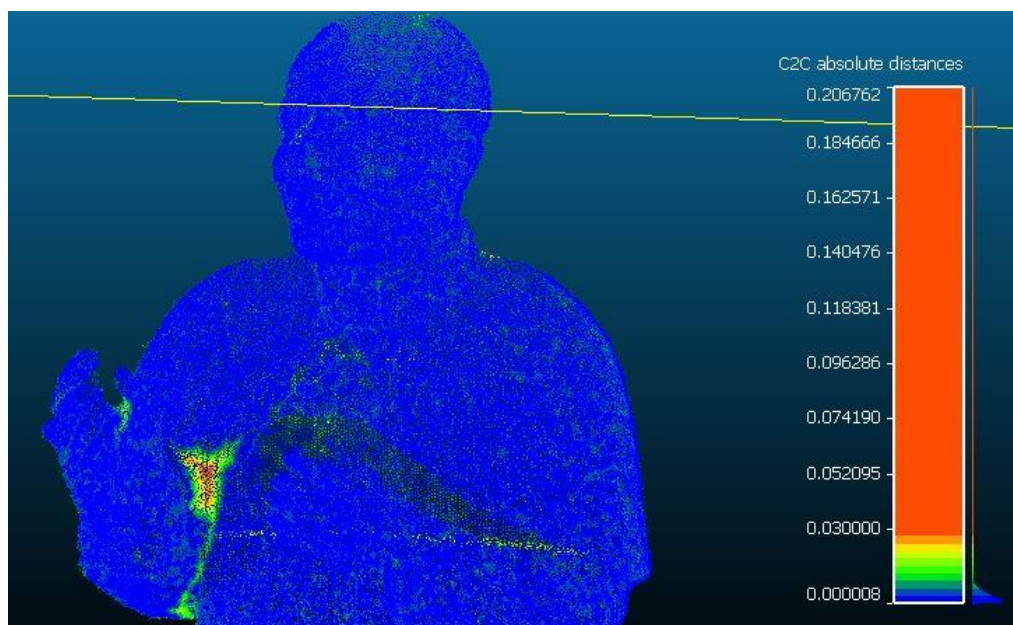
1	Min dist.	0
2	Max dist.	0.19771
3	Avg dist.	0.00180709
4	Sigma	0.00909343
5	Max error	0.0100372

Obr. 21: Přibližné výsledky výpočtu absolutních vzdáleností mračna ze Surphaseru od mračna z BLK360 registrovaného automaticky v ReCap pro; hodnoty jsou uvedeny v metrech

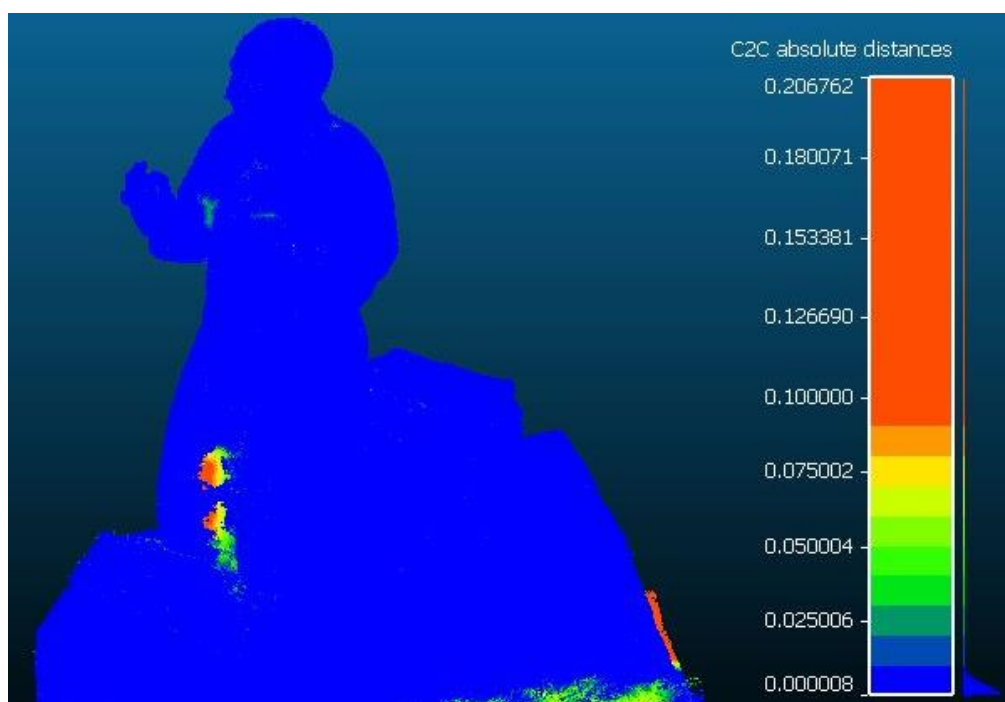
Výsledky porovnání mračen získaných pomocí BLK360 a Surphaseru 25HSX jsou zobrazeny na následujících obrázcích formou hypsometrické škály. Z obrázků je patrné, že v záhybech a úzkých místech vznikaly větší odchylky pohybující se okolo 1 až 2 centimetrů.



Obr. 22: Porovnání dvou mračen – hypsometrická škála



Obr. 23: Porovnání dvou mračen – hypsometrická škála

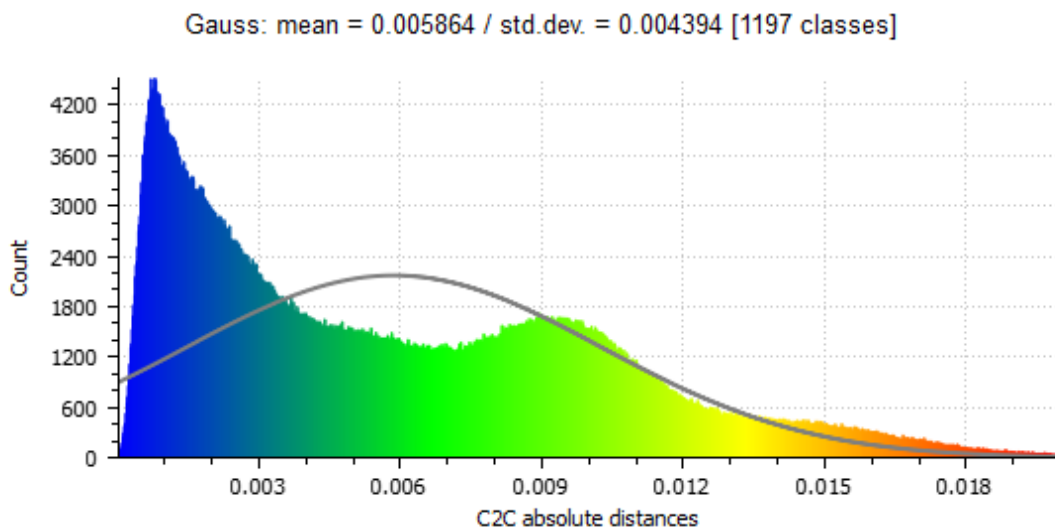


Obr. 24: Porovnání dvou mračen – hypsometrická škála

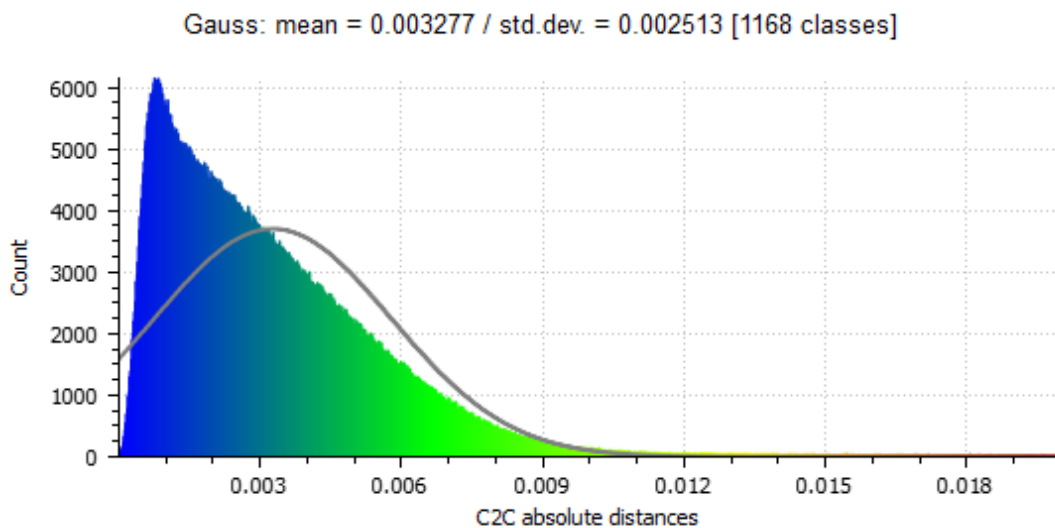
Odchyly mezi nohama kardinála Berana (obr. 24), které se pohybují dokonce i okolo 10 cm, byly způsobeny překážkou při skenování. Při měření skenerem Leica BLK360 byla na tomto místě umístěna svíčka.



Následující histogramy ukazují rozložení dat v rozsahu od 0 do 0,02 metru pro srovnání ruční i automatické registrace s mračnem ze Surphaseru.



Obr. 25: Absolutní vzdálenosti mračka získaného pomocí Surphaseru od mračka skenovaného pomocí BLK360 a registrovaného ručně v software Cyclone; hodnoty na horizontální ose jsou uvedeny v metrech



Obr. 26: Absolutní vzdálenosti mračka získaného pomocí Surphaseru od mračka skenovaného pomocí BLK360 a registrovaného automaticky v software ReCap Pro; hodnoty na horizontální ose jsou uvedeny v metrech



Histogramy v porovnání s Gaussovou křivkou zobrazenou v grafech dokazují, že data manuálně registrovaná jsou doprovázena větším počtem nahodilých chyb – lidský faktor – a nepodléhají tak zásadám Gaussova rozdělení. To znamená, že takto registrovaná data jsou méně předvídatelná.

Výsledné hodnoty tohoto testu jsou zobrazeny v tabulce 8. Data registrovaná automaticky pomocí software ReCap Pro se více přiblížila k teoreticky přesnějším datům (Surphaser); z toho vyplývá, že v tomto testu byla automatická registrace provedena s vyšší přesností než manuální registrace.

Tabulka 8: Porovnání výsledků výpočtů absolutních vzdáleností pro ruční a automatickou registraci skenů z BLK360 se skeny ze Surphaseru, [m]

	Surphaser – BLK360 (Cyclone)	Surphaser – BLK360 (ReCap Pro)
	Ruční registrace	Automatická registrace
Průměrná vzdálenost [m]	0,006822	0,004241
Směrodatná odchylka [m]	0,009304	0,008787

4.2. Funkce přístroje vybaveného IMU jednotkou

Testovaný přístroj je vybaven IMU jednotkou, která umožňuje při náklonu do 5° automatickou orientaci. Tato kapitola je věnována testování funkce této IMU jednotky zabudované v přístroji Leica BLK360.

4.2.1. Popis experimentu

Pro tento experiment byla zvolena rovná dlouhá pravidelná chodba, která byla naskenována dvěma způsoby. Při prvním způsobu bylo dbáno na to, aby byl skener co nejlépe zhorizontován. Pro druhý postup byla zvolena nedbalá horizontace, která měla simulovat náročnost odhadnutí přesné horizontace ve složitějších prostorech nebo terénech, neboť přístroj není vybaven ani libelou. Při měření na rovné chodbě byl skener odchýlen od vertikály, což bylo pro tento účel záměrem. Při tomto testu nebylo přesně určeno, o kolik byl přístroj odchýlen.



Pro každé měření bylo použito více stanovisek, proto musela být data nejprve zaregistrována a poté mohla být porovnána pomocí software CloudCompare.

4.2.2. Postup měření

Pro měření byla zvolena chodba, na které bylo provedeno skenování ze tří stanovisek. Toto skenování bylo provedeno dvakrát s tím rozdílem, že jednou byla horizontace provedena a podruhé ne. Stanoviska byla pro obě měření shodná.

4.2.3. Postup zpracování

Aby data mohla být porovnána, muselo být nejprve provedeno spojení skenů z jednotlivých stanovisek do celistvého bodového mračka zvlášť pro oba způsoby měření. Tato dvě bodová mračka byla importována do programu CloudCompare, kde nejprve musela být transformována do stejného místního souřadnicového systému tak, aby se překrývala. Tato transformace mohla být provedena i v software Cyclone, což bylo použito při testování vlivu mezního nabití baterie.

Poté byl proveden výpočet vzdáleností těchto dvou mraček (Cloud to Cloud Distances). Jako referenční mračno bylo zvoleno to, při jehož měření bylo dbáno na správné urovnání přístroje. Tím byly vypočteny odchylky mračka měřeného s horizontálně neurovnaným přístrojem od mračka s urovnaným přístrojem.

Po zhodnocení výsledků byl výpočet absolutních vzdáleností proveden znovu s jinými parametry tak, aby do výpočtu nebyla zařazena odlehlá měření. Tím mohly být výsledky lépe interpretovány.

4.2.4. Analýza výsledků

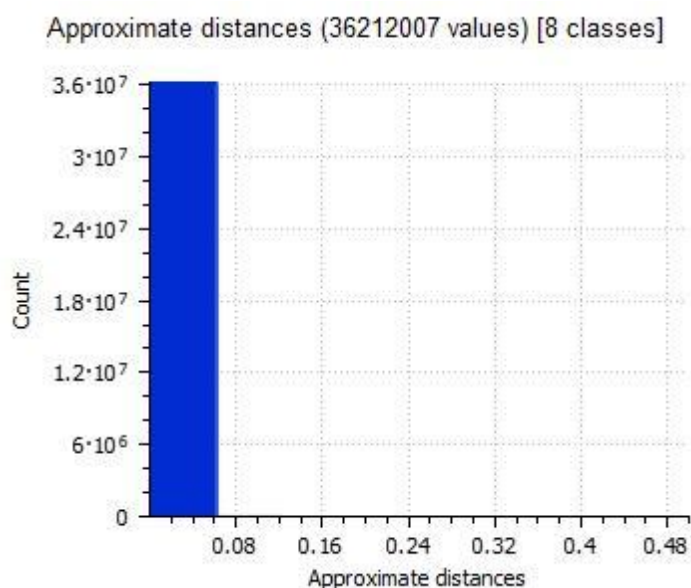
První výpočet absolutních vzdáleností:

Při prvním výpočtu byla pro maximální vzdálenost ponechána defaultně nastavená hodnota 1,95122 m, která byla převzata z přibližného výpočtu, který program automaticky provede před každým výpočtem. Přibližné výsledky jsou zaznamenány na obrázcích 27 a 28.



1	Min dist.	0
2	Max dist.	1.95122
3	Avg dist.	7.71837e-6
4	Sigma	0.002662
5	Max error	0.436305

Obr. 27: Přibližné výsledky výpočtu absolutních vzdáleností, uvedené v metrech



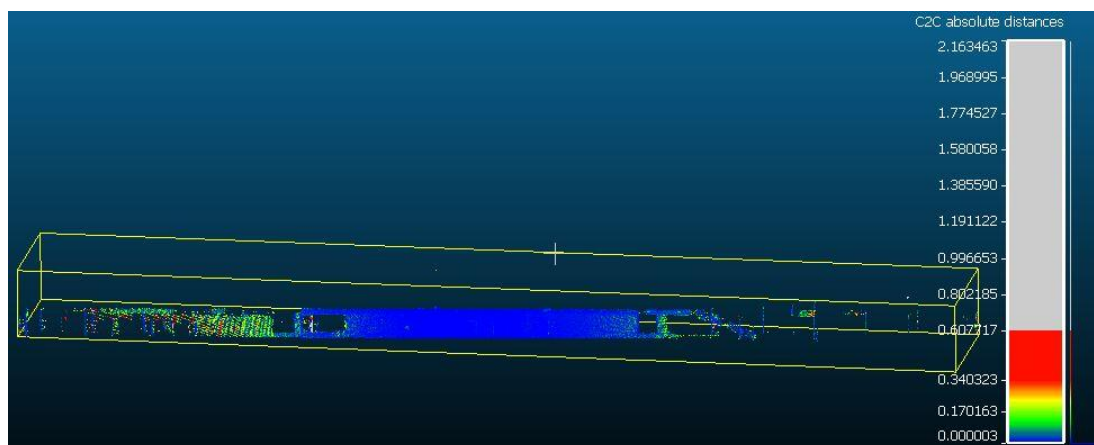
Obr. 28: Přibližný výpočet vzdáleností – histogram, hodnoty na horizontální ose jsou v metrech

V následující tabulce jsou zobrazeny výsledné hodnoty po prvním výpočtu.

Tabulka 9: Výsledné hodnoty výpočtu absolutních vzdáleností

Průměrná vzdálenost [m]	0,002552
Směrodatná odchylka [m]	0,003516
Doba trvání výpočtu [s]	610,56

K interpretaci výsledků byla zobrazena hypsometrická škála. Z obrázku je pak patrné, že data v bezprostřední blízkosti stanovisek jsou naměřena s velkou přesností, i když přístroj nebyl urovňán zcela přesně. Avšak data nacházející se 20 a více metrů od stanovisek jsou více odchýlena.



Obr. 29: Porovnání dvou mračen z prvního výpočtu – hypsometrická škála

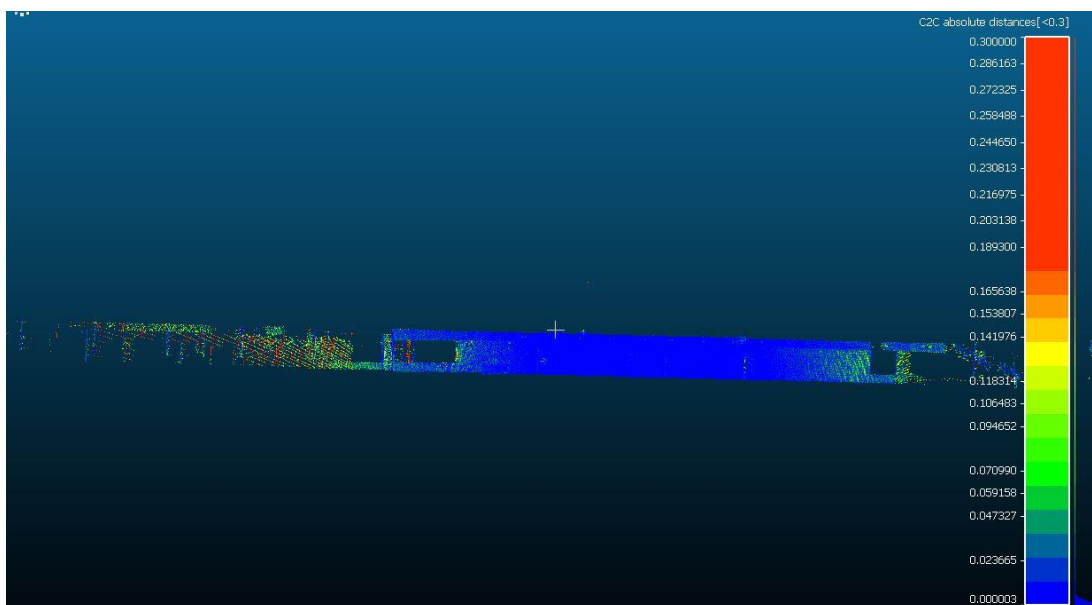
Druhý výpočet absolutních vzdáleností:

Při druhém výpočtu byla nastavena maximální vzdálenost 30 cm, čímž byly z výpočtu vyřazeny hodnoty větší než tato hodnota. Výsledné hodnoty druhého výpočtu jsou zobrazeny v tabulce 9.

Tabulka 10: Výsledné hodnoty výpočtu absolutních vzdáleností

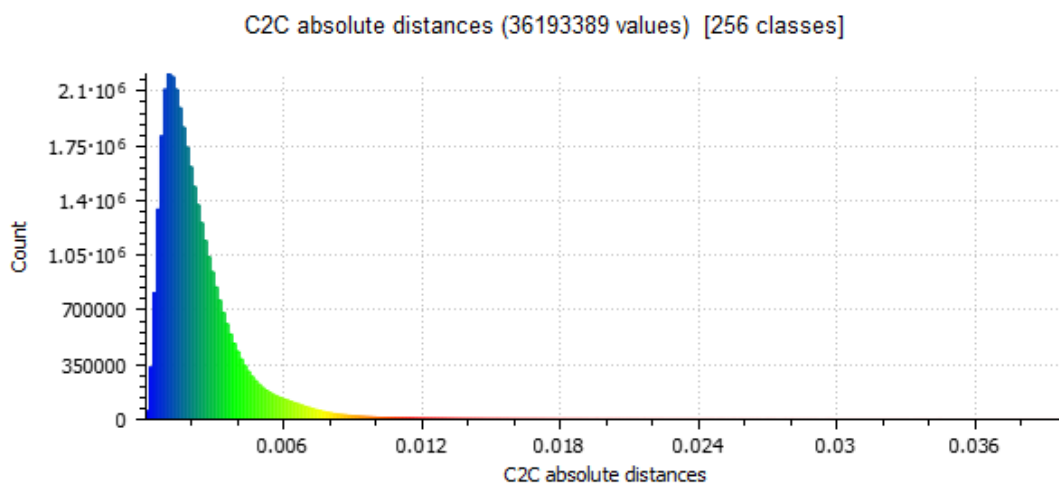
Průměrná vzdálenost [m]	0,002549
Směrodatná odchylka [m]	0,002966
Doba trvání výpočtu [s]	135686,59

Ve výsledném bodovém mračnu zobrazeném pomocí hypsometrické škály, které je na obrázku 30, byla změřena vzdálenost od krajního stanoviště k zeleně vyznačeným bodům. A tím bylo zjištěno, že již ve vzdálenosti 11 metrů od stanoviště dochází k odchylce v řádu centimetrů.



Obr. 30: Porovnání dvou mračen z druhého výpočtu – hypsometrická škála

Díky vyřazení odlehlých měření byla data v histogramu lépe rozložena a tím byla zvýšena jeho vypovídající hodnota o datech v blízkosti stanovišek. Tento histogram je zobrazen na obrázku 31.



Obr. 31: Porovnání dvou mračen – histogram – na vertikální ose je počet bodů, na horizontální ose je absolutní vzdálenost dvou mračen v metrech

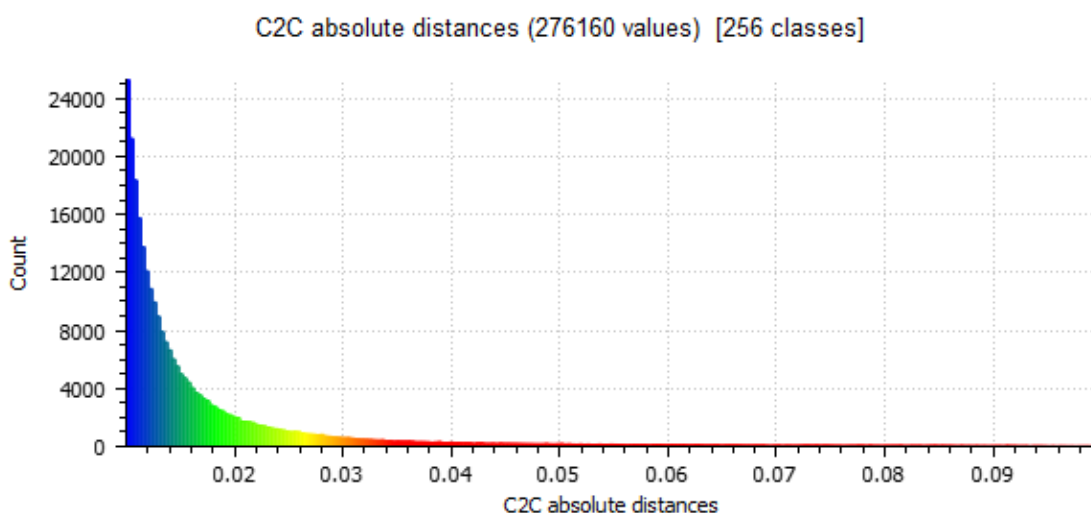


V následující tabulce 10 jsou porovnány výsledné hodnoty z prvního a druhého výpočtu. Z tabulky vyplývá, že vyřazením odlehlých měření byla snížena směrodatná odchylka.

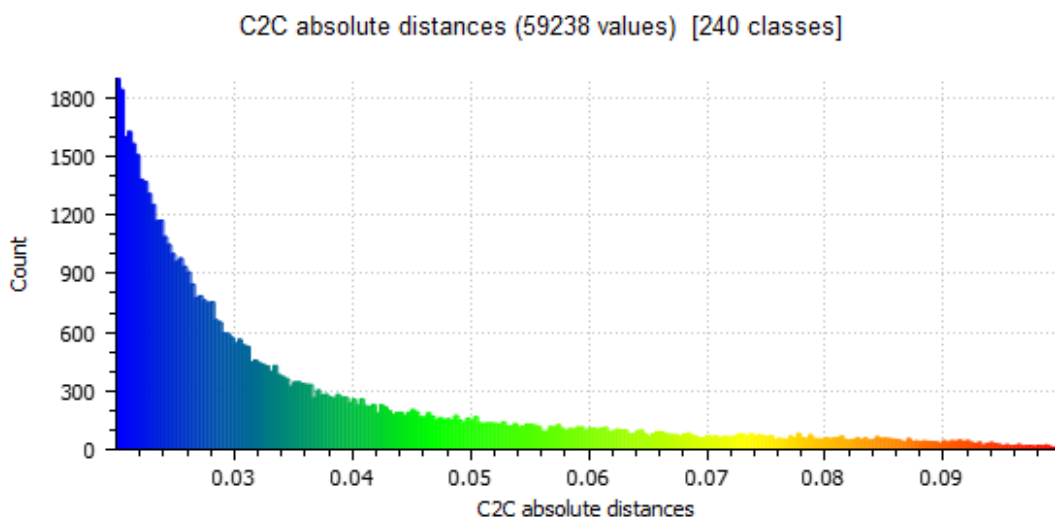
Tabulka 11: Porovnání výsledných hodnot z prvního a druhého výpočtu

	První výpočet	Druhý výpočet
Průměrná vzdálenost [m]	0,002552	0,002549
Směrodatná odchylka [m]	0,003516	0,002966
Doba trvání výpočtu	10 m 11 s	37 h 41 m 27 s

Po změně parametru výpočtu – snížení maximální vzdálenosti na 30 cm – došlo z neznámých důvodů ke značnému zpomalení výpočtu na více než 37 hodin. Bohužel nebylo zjištěno, čím byla tato doba trvání ovlivněna. Alternativou pro vyřazení odlehlých měření by mohla být funkce „Filter points by value“, která umožňuje filtrování dat. Tímto postupem by nebyla vypočtena nová průměrná vzdálenost a směrodatná odchylka, nicméně pro účely této práce by byla dostačující. Příklady užití této funkce za účelem lepší interpretace výsledků jsou zobrazeny na následujících obrázcích 32 a 33.



Obr. 32: Histogram – zobrazená data od 1 do 10 cm, (hodnoty na horizontální ose jsou uvedeny v metrech)



Obr. 33: Histogram – zobrazená data od 2 do 10 cm, (hodnoty na horizontální ose jsou uvedeny v metrech)

Pro zobrazení počtu dat s nižší přesností byla provedena filtrace znovu a byla zobrazena data s odchylkou větší než 2 cm (obr. 33). Z histogramu plyne, že počet dat s odchylkou okolo 2 cm se pohybuje v řádu tisíců.

4.3. Registrace pomocí terčů

Software Cyclone nabízí funkci automatického vyhledávání terčů v bodovém mračnu, kde je možné vyhledávat tři typy terčů – HDS Target, Black/White Target, Spehre Target. Tento test byl zaměřen na černobílé terče, které byly vytisknuty na papír formátu A4.

4.3.1. Popis experimentu

V tomto experimentu bylo testováno automatické vyhledávání terčů na různou skenovanou vzdálenost a za různých světelných podmínek. Pro testování byla zvolena odlišná prostředí, ve kterých byl umístěn terč a provedeno měření. Test byl proveden pro dvě různá nastavení přístroje, pro střední a plné rozlišení.

Při skenování se středním rozlišením bylo testování provedeno pouze v jednom prostředí. Tím byla dlouhá chodba a terč byl umístěn na jejím konci. Skenování bylo

provedeno dvakrát, jednou s přisvětlením a poté v pološeru. Obě situace jsou znázorněny na obrázku 34.



Obr. 34: Porovnání světelných podmínek při skenování terče

Při plném rozlišení bylo skenování provedeno pro více prostředí. Nejprve byl terč umístěn v exteriéru a měření bylo provedeno za polojasného počasí. Dále byl terč umístěn v interiéru bez oken a měření bylo provedeno za umělého neměnného osvětlení. Poté byl takto umístěný terč ještě přisvětlen bodovým světlem a měření bylo provedeno znovu. Poslední testovanou situací byl terč umístěný na vnitřní straně okna a měření bylo realizováno během dne, tudíž docházelo k jeho podsvětlení z venkovní strany a tím byl snížen kontrast.



4.3.2. Postup měření

Průběh měření byl pro každou situaci obdobný. Terč byl umístěn na strom, zeď nebo okno a měření bylo prováděno po deseti metrech v rozsahu od 10 do 60 metrů, neboť 60 metrů je dosah testovaného přístroje udávaný výrobcem.

Pro každou situaci byl nejprve přístroj umístěn ve vzdálenosti 10 metrů od terče a bylo zahájeno skenování. Skener byl postupně vzdalován od terče a každých 10 metrů bylo provedeno měření.

4.3.3. Postup zpracování

Terče jsou v Cyclone vyhledávány automaticky tak, že je zvolena oblast mračna, ve které se terč nachází, a vybrán typ terče. Software poté vyhledá a rozpozná terč a označí jeho střed. Test vyhledání terče byl proveden zvlášť pro každý sken.

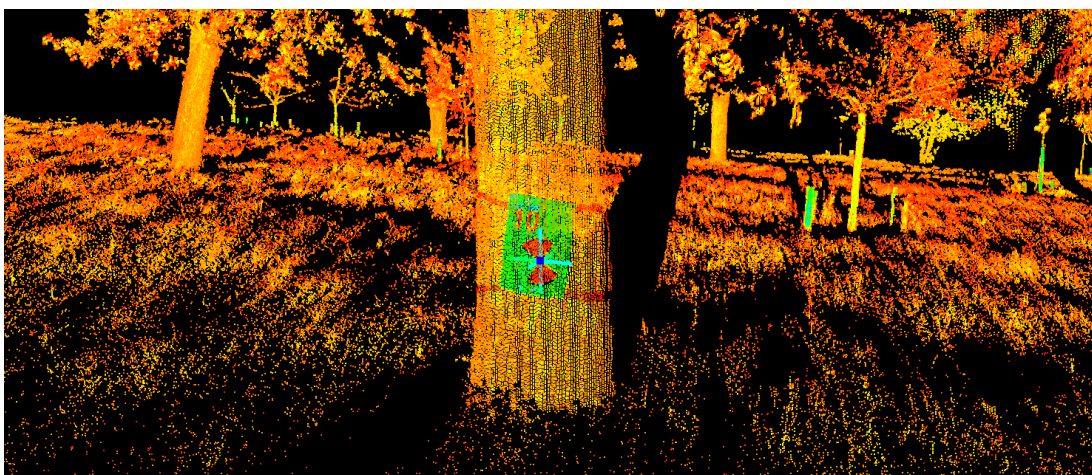
4.3.4. Analýza výsledků

Střední rozlišení:

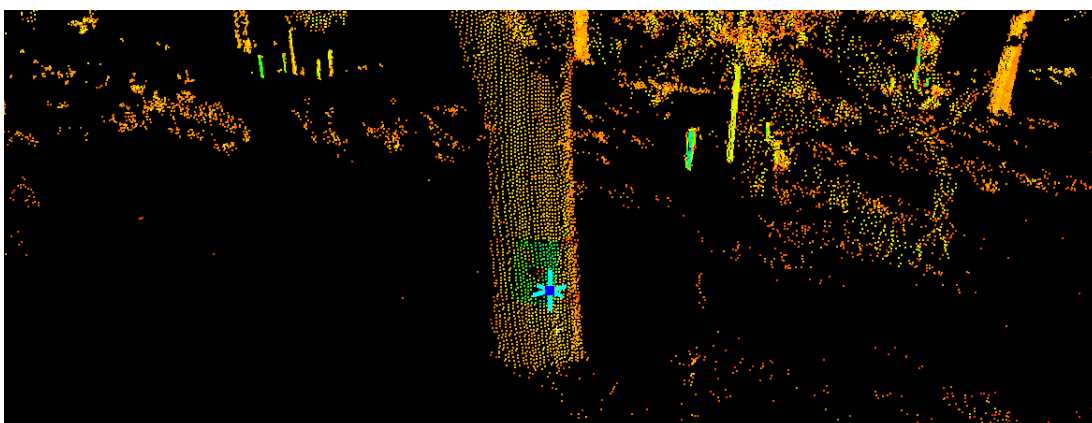
Při nastavení středního rozlišení bylo bodové mračno poměrně řídké. To způsobilo, že terč byl nalezen pouze na skenovanou vzdálenost 10 metrů pro obě varianty osvětlení.

Plné rozlišení:

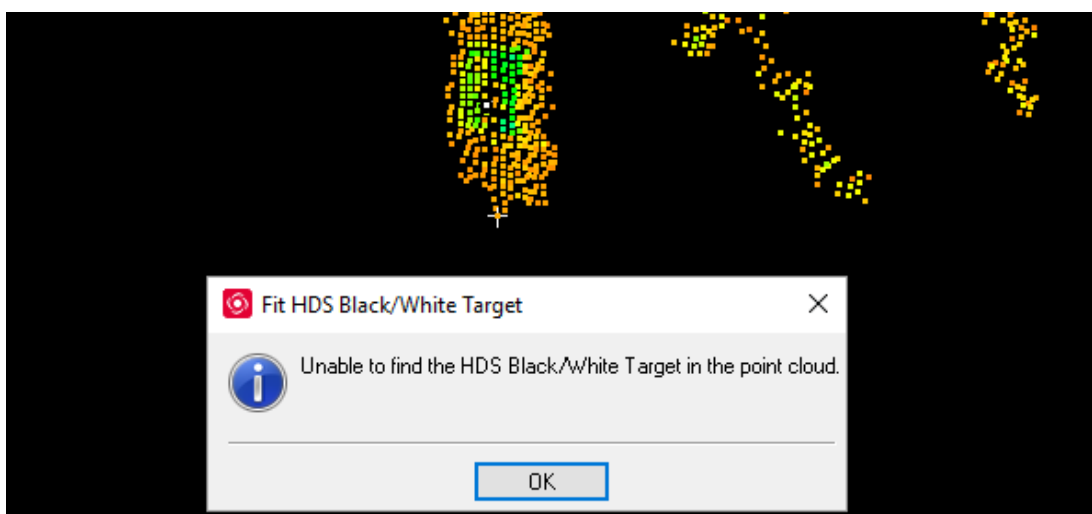
Na následujících třech obrázcích je znázorněna situace z venkovního měření při plném rozlišení. Na prvním z obrázků (Obr. 35) je úspěšné vyhledání terče programem Cyclone, kterého bylo docíleno až do vzdálenosti 30 metrů. Druhý obrázek (Obr. 36) znázorňuje situaci chybně vyhledaného terče. Tato situace byla zaznamenána na vzdálenost 40 a 50 metrů. Na třetím z těchto obrázků (Obr. 37) je zobrazena chybová hláška, kterou Cyclone ohlásí v momentě, kdy již není schopen v bodovém mračnu zvolený typ terče vyhledat.



Obr. 35: Úspěšný nalezení terče - 10 m, 20 m, 30 m

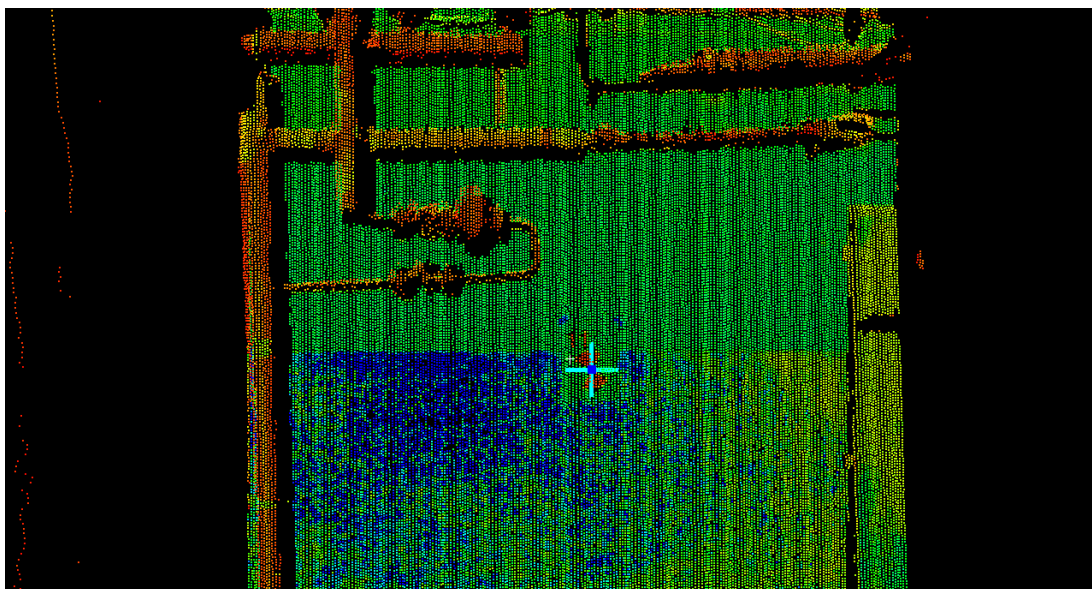


Obr. 36: Chybné vyhledání terče - 40 m, 50 m

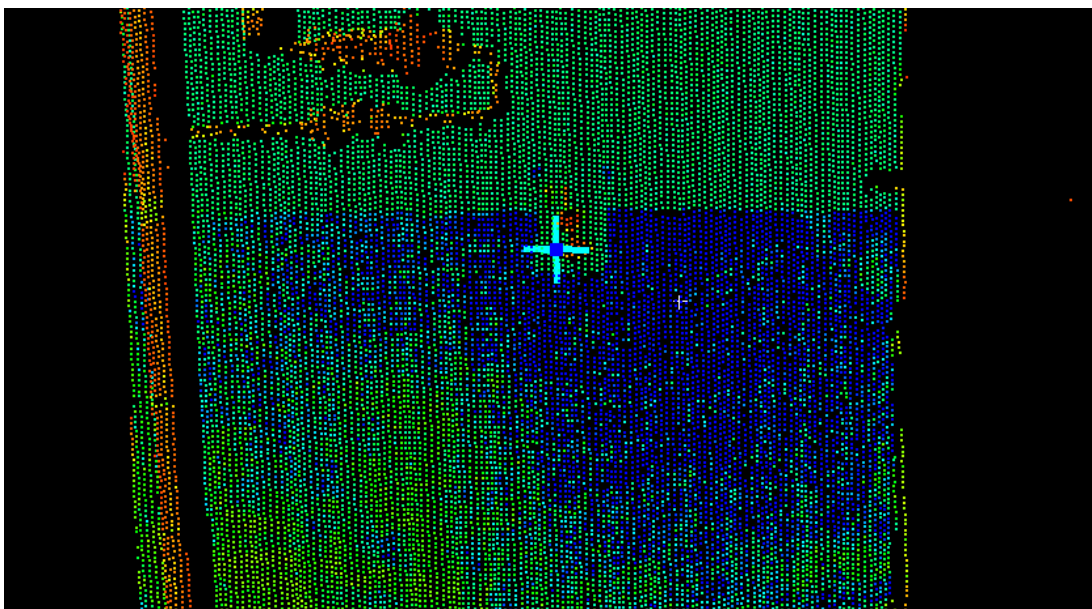


Obr. 37: Chybová hláška vyhledání terče - 60 m

Při měření ve sklepních prostorech za stálého umělého osvětlení byl terč úspěšně nalezen pouze do vzdálenosti 20 metrů. Na větší skenovanou vzdálenost bylo určení středu terče programem Cyclone spíše nahodilé.

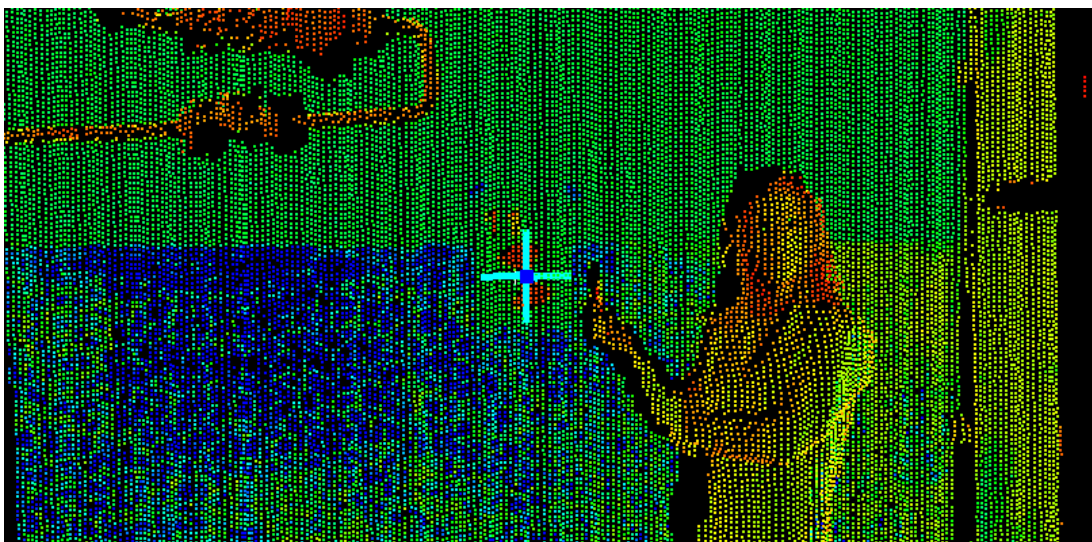


Obr. 38: Úspěšné nalezení terče - 10 m, 20 m

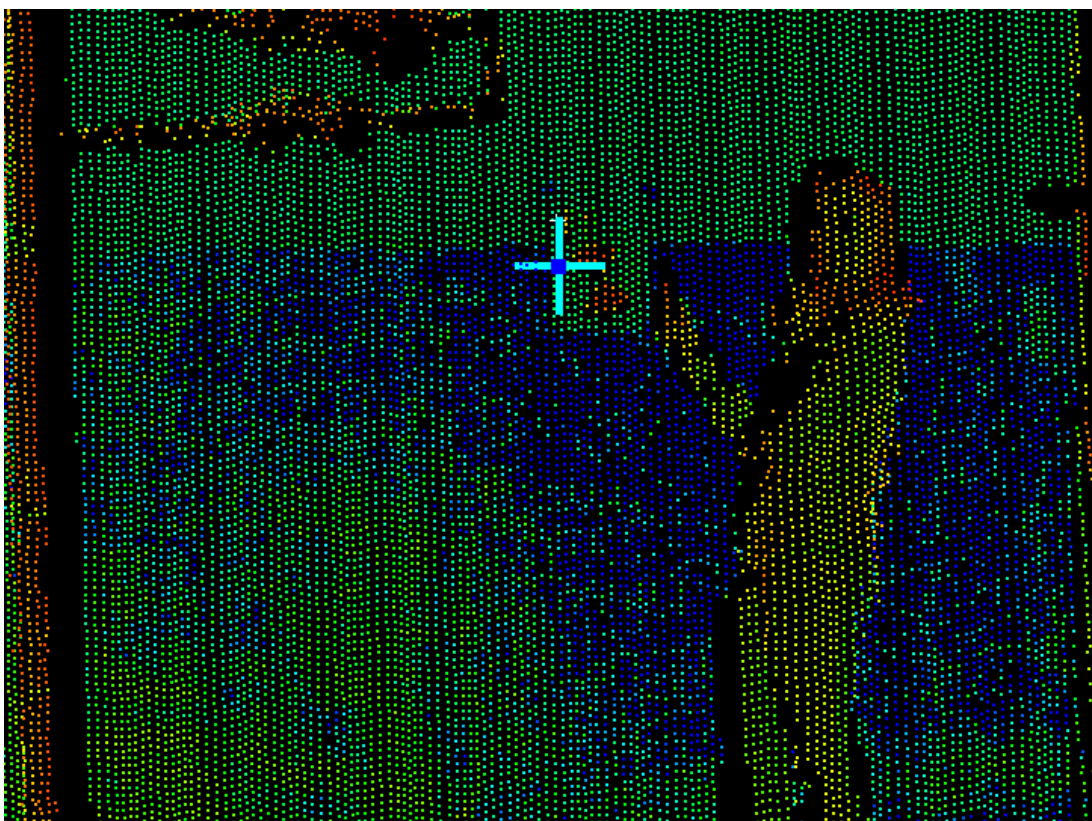


Obr. 39: Chybné vyhledání terče - 30 metrů a více

Bodové přisvětlení terče na jeho vyhledání nemělo v podstatě žádný vliv, jak je patrné z obrázků 40 a 41.

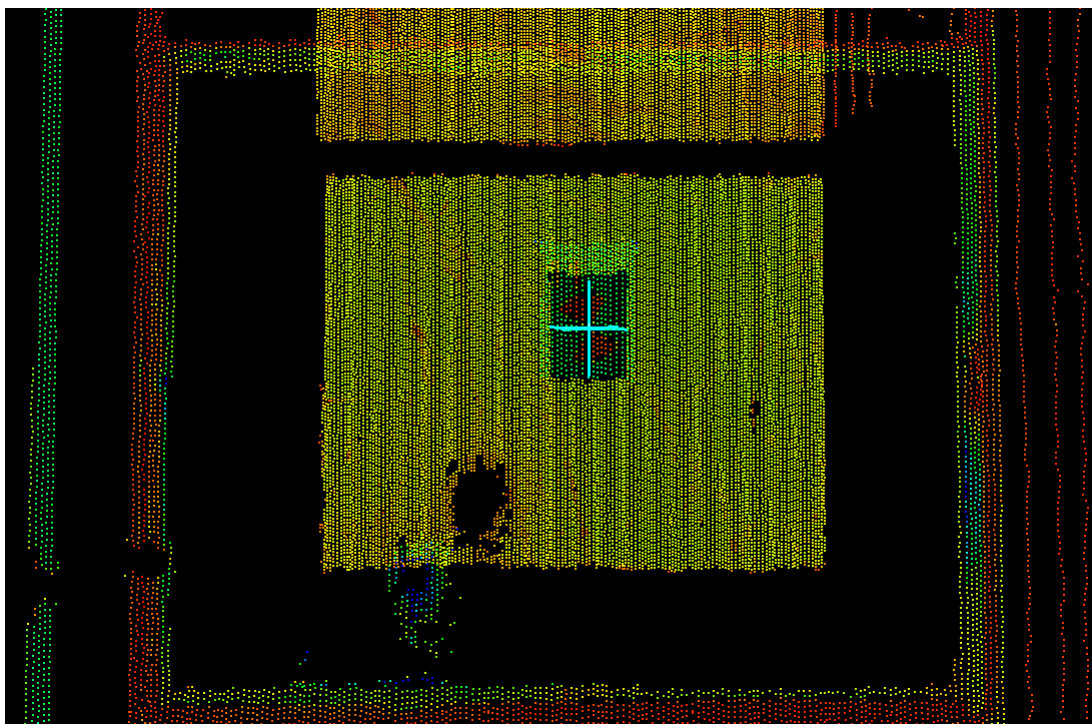


Obr. 40: Úspěšné nalezení terče - 10 m, 20 m

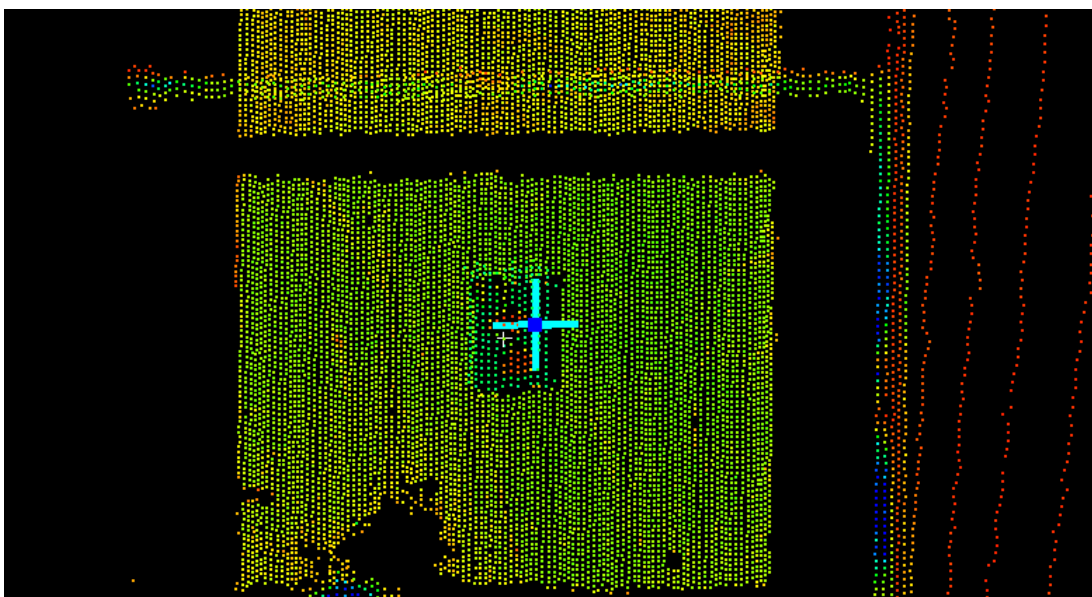


Obr. 41: Chybné vyhledání terče - 30 metrů a více

Ani při umístění terče na okno nedocházelo k výrazně odlišným výsledkům. Terč byl úspěšně vyhledán na vzdálenost 10 a 20 metrů. Větší vzdálenost způsobovala odchylky při určování středu terče.



Obr. 42: Úspěšné nalezení terče - 10 m, 20 m



Obr. 43: Chybné vyhledání terče - 30 metrů a více



4.4. Měření v mezních stavech nabití baterie

V tomto testu bylo zkoumáno, zda má slabá baterie vliv na přesnost výsledného bodového mračna.

4.4.1. Popis experimentu

Pro účely tohoto testu bylo provedeno měření ve dvou různých stavech nabití baterie. Aby toto kritérium mohlo být objektivně posouzeno, musely být pro oba stavy dodrženy stejné okolní podmínky, např. stejný prostor, stejné světelné podmínky, zamezení pohybu osob, aj. Prvním stavem byla plně nabitá baterie (100 %), druhým stavem byla baterie nabitá na 35 % v okamžiku zahájení měření. Tento stav nabití baterie byl zvolen z toho důvodu, aby během měření neklesla hodnota nabití baterie pod 20 %, což je hodnota doporučená výrobcem pro začátek nabíjení baterie.

Tato bodová mračna poté byla porovnána a bylo zhodnoceno, zda má stav nabití baterie vliv na přesnost výsledného bodového mračna.

4.4.2. Postup měření

Pro měření byla zvolena místnost o rozměrech cca 6x6 metrů. Přístroj byl umístěn co nejvíce uprostřed a zároveň tak, aby bylo po naskenování co nejméně slepých míst. Pro skenování bylo nastaveno střední rozlišení. V místnosti byly rozmístěny čtyři terče z toho důvodu, aby následně skeny mohly být co nejpřesněji zorientovány pro vzájemné porovnání. Tím byl eliminován faktor nepřesné orientace, který by mohl zkreslit výsledek testu.

Nejprve bylo provedeno měření s plně nabitou baterií, poté byla baterie vyměněna za jinou, která již byla vybita na 35 %, aniž by došlo k posunutí stativu tak, aby skenování bylo provedeno z totožného stanoviska. Pak mohlo být zahájeno skenování.

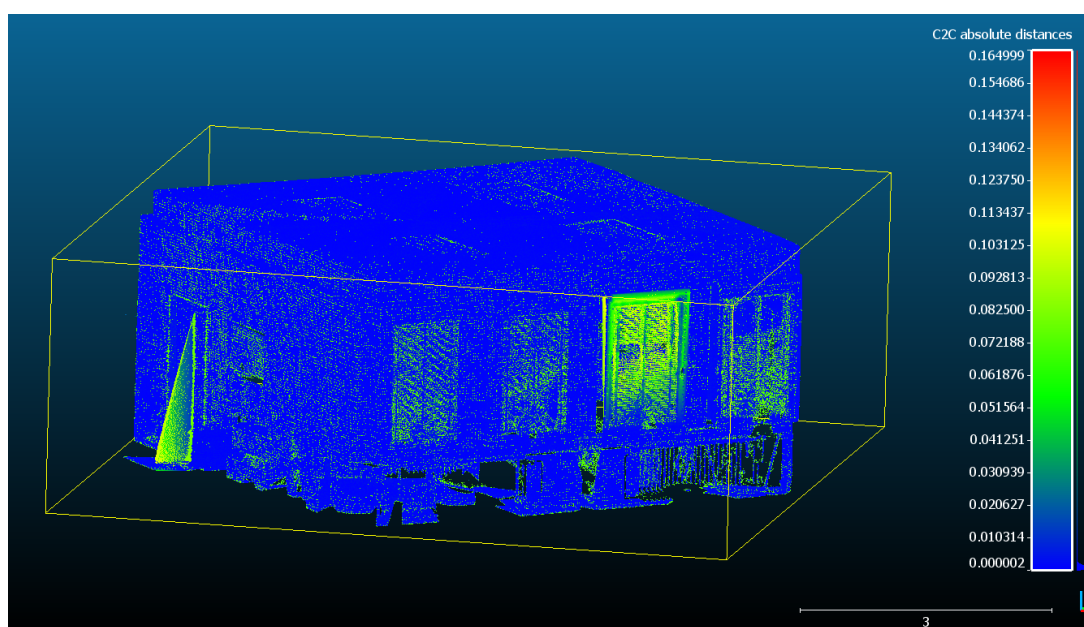
4.4.3. Postup zpracování

Data byla naimportována do programu Leica Cyclone, kde byly skeny na základě použitých terčů registrovány, aby byly ve stejném místním souřadnicovém systému.

Nejprve byly terče očíslovány tak, aby se v obou mračnecích čísla shodovala. Poté mohla být vypočtena samotná transformace a tím data registrována.

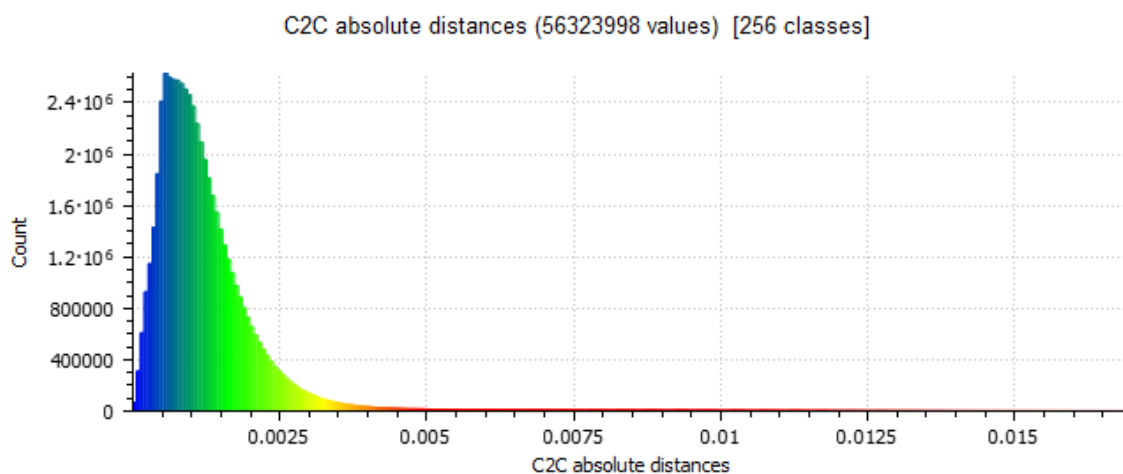
Registrace byla v tomto testu provedena z toho důvodu, aby skeny po otevření v software CloudCompare byly již stejně orientovány, a tudíž se naprosto překrývaly. Takto „totožná“ mračna byla porovnána pomocí funkce C2C (Cloud to Cloud), která vypočte absolutní vzdálenosti dvou mračen. Jako referenční bodové mračno bylo zvoleno mračno, které bylo skenováno s plně nabitou baterií.

4.4.4. Analýza výsledků



Obr. 44: Porovnání dvou bodových mračen – hypsometrická škála

Na obrázku 44 jsou pomocí hypsometrické škály zobrazeny absolutní vzdálenosti dvou mračen. Z těchto barev je patrné, že na zdech jsou odchylky minimální. Převážná většina dat tak nepřekračuje 1 cm, což je zjevné z histogramu na pravé straně. Tento histogram je detailně vyobrazen na obrázku 45. Větší odchylky, v řádech centimetrů, poté vznikají v prostoru oken a dveří.



Obr. 45: Porovnání dvou bodových mračen – histogram – na vertikální ose je počet bodů, na horizontální ose je absolutní vzdálenost dvou mračen v metrech



5. Rekapitulace výsledků a zhodnocení možností použitelnosti BLK360

Použití automatické registrace v software ReCap Pro je velmi praktické, neboť může být provedeno přímo při měření. Ovládání tabletu je intuitivní a aplikace umožňuje zpřesnění automatické registrace označením identických bodů na panoramatických snímcích. Možnost automatické registrace zvyšuje efektivitu práce a snižuje časovou náročnost na zpracování dat 3D laserového skenování. Ani přesností automatická registrace nezaostává za klasickým provedením registrace například v programu Leica Cyclone. Porovnáním takto registrovaných dat byla dosažena průměrná vzdálenost těchto stejných, avšak jinak zpracovaných dat, v řádech několika milimetrů. Největší odchylky, téměř 1 cm, pro testovaná data byly vypočteny v případě schodů. Z tohoto výsledku tedy vyplývá, že při měření rovinného území by mělo být skenování přesnější než při měření horizontálně členitých terénů. Srovnání výsledků porovnání mračen registrovaných automaticky a ručně pro různá prostředí je uvedeno v tabulce 13, kde jsou uvedeny také délky trvání výpočtů absolutních vzdáleností dvou mračen. Nicméně porovnání časů není zcela relevantní, neboť pro výpočet byly použity počítače s různými výkonnostními parametry.

Tabulka 122: Porovnání výsledných hodnot automatické registrace

	Chodba	Schody	Socha kar. Berana
Průměrná vzdálenost [m]	0,002049	0,008772	0,002518
Směrodatná odchylka [m]	0,002109	0,020283	0,002245
Doba trvání výpočtu [s]	330,13	863,45	543,40

Relativní porovnání automatické a ruční registrace však nevypovídá nic o přesnosti, neboť jen mezi sebou porovnáváme stejná data zpracovaná dvěma způsoby a nejsme tedy schopni říci, kterým z těchto způsobů získáme přesnější data.

Proto byl proveden další test – porovnání s daty měřenými skenovací stanicí Surphaser 25HSX – kde byla testovaná data přímo vztahována k datům z tohoto přístroje. Na základě přesností použitých skenerů můžeme říci, že mračno naskenované pomocí Surphaseru je teoreticky přesnější. Tudíž bylo cílem experimentu se co nejvíce



tomuto mračnu přiblížit. V provedeném testu toto kritérium lépe splňuje mračno automaticky registrované v software ReCap Pro. Z toho teoreticky vyplývá, že automatická registrace je v tomto případě přesnější než registrace ruční. Nicméně nesmíme zanedbat lidský faktor, který v případě ruční registrace hraje zásadní roli. Manuální registrace by mohla být dále zpřesňována například pomocí vyššího počtu identických bodů, až by překročila přesnost automatické registrace.

Funkce IMU jednotky zabudované v přístroji by dle výrobce měla fungovat správně při maximálním naklonění do 5° . Což je však prakticky nemožné určit, neboť přístroj není vybaven libelou a ani nehlásí dosažení limitu sklonu. Proto je použití přístroje vhodné především při skenování interiérů nebo rovinatých územích, kde může být přístroj spolehlivě zhorizontován i bez použití libely. Tento nedostatek by mohl být v praxi potlačen či úplně eliminován použitím sázecí libely nebo destičky, na níž by byla libela položena. I takto určená hrubá horizontace přístroje by mohla způsobit jisté odchylky, které by však nedosahovaly 5° , a tudíž by takto způsobená chyba byla zanedbatelná.

Z testu plyne, že při skenování na delší vzdálenost se špatně urovnaným přístrojem IMU jednotka nemusí fungovat zcela správně, což může vést ke špatnému zorientování přístroje a následným odchylkám při registraci mračen. Tento faktor může být do jisté míry eliminován zvýšením počtu stanovisek, nicméně ani to není vždy základem úspěchu. Po konzultaci s odborníky ze společnosti Gefos a. s. bylo zjištěno, že například při skenování dlouhého úseku může docházet k chybám v řádech až desítek centimetrů ve výšce.

Obecně by se dalo říci, že při skenování s plným rozlišením je možné terč úspěšně vyhledat do vzdálenosti 30 metrů v exteriéru za jasného počasí a do 20 metrů v interiéru. Na větší vzdálenosti mohou vznikat nepřesnosti, v ojedinělých případech může být terč nalezen správně, ale převážně je jako střed označeno náhodné místo poblíž terče. Ve vzdálenosti 60 metrů a více již software Cyclone ohlásí, že není možné zvolený typ terče nalézt. Lidský faktor není možné zatím zcela eliminovat, nicméně funkce automatického vyhledávání terčů značně usnadní práci při zpracovávání dat.



Při testování vlivu mezního nabití baterie nebyly zjištěny žádné výrazné problémy, tedy stav nabití baterie nemá značný vliv na přesnost skenování.



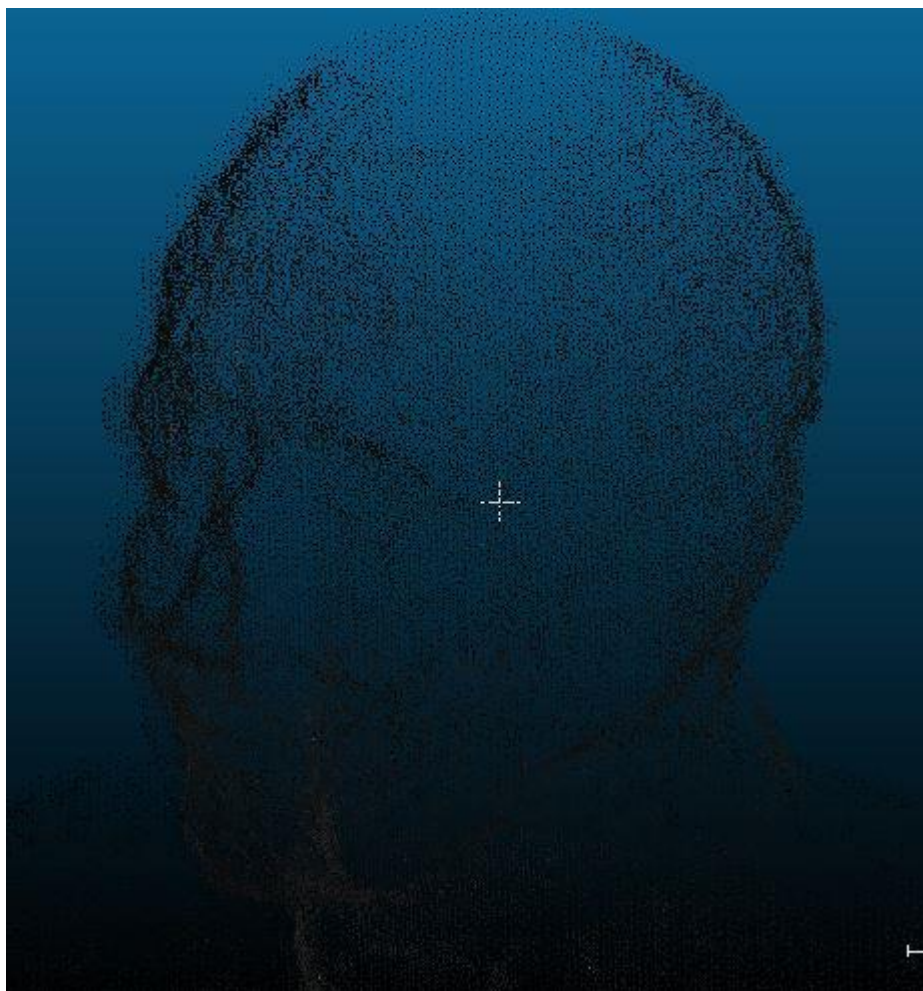
6. Závěr

Obecně by se dalo říci, že základem úspěchu při skenování s 3D laserovým skenerem Leica BLK360 je vysoký počet stanovisek. Tím může být zlepšena přesnost při registraci, neboť dochází k větším překrytům a snížení počtu slepých míst. Velkou výhodou testovaného přístroje je možnost automatické registrace, která může být provedena přímo při měření pomocí nainstalované aplikace ReCap Pro v tabletu Apple iPad Pro, což sníží časové nároky na zpracování. Přesnost takto provedené registrace je srovnatelná s provedením v software Leica Cyclone. Pokud jsou stanoviška volena obezřetně, aplikace provede automatickou registraci s dostatečnou přesností. Nicméně další výhodou je možnost ručního označení identických bodů, kterého může být využito v případě, že dosažená přesnost automatické registrace není dostačující, nebo při skenování prostorů, kde lze obtížně dosáhnout postačujících překrytů, jako jsou klikaté chodby, schodiště, aj. Za použití terčů při skenování je opět vhodný vyšší počet stanovisek, čímž dojde k dosažení co nejkratších vzdáleností terčů od stanovisek a středy terčů tak mohou být spolehlivě vyhledány při registraci v software Cyclone.

Nevýhodou skeneru Leica BLK360 je chybějící libela, která by do jisté míry eliminovala lidský faktor při horizontaci přístroje a tím napomohla IMU jednotce ke správné funkci. Přístroj je schopen za velmi krátký čas naskenovat obrovské množství bodů, což zvyšuje rychlost a efektivitu měření, nicméně při skenování ve vysokém rozlišení a při použití velkého počtu stanovisek jsou kladeny vysoké nároky na hardware a software použitý ke zpracování. Tento problém byl zaznamenán při zpracování této diplomové práce, kde při naskenování vysokého počtu bodů, v řádech stovek milionů, musela být data zředěna, aby následná práce s nimi byla efektivní, ba dokonce i v některých případech vůbec možná.

Skener je vhodný především do interiérů, kde můžeme s jistotou říci, že podlaha je vodorovná. I v exteriérech najde BLK360 své využití, avšak musí být dbáno na to, za jakým účelem má být skenování provedeno a jaké přesnosti by mělo být dosaženo. Jako příklad použitý k testování v této práci může sloužit socha kardinála Berana. Na detailu jeho hlavy, zobrazeném na obrázku 47, jsou patrné drobné nepřesnosti. V levé části

zobrazeného mračna nejsou body zcela v jedné rovině. Odchylka bodů od roviny obličeje se pohybuje okolo 1 cm, což je však pro detaily sochy nepřijatelné.



Obr. 46: Detail hlavy sochy kardinála Berana



Seznam obrázků

Obr. 1: Princip laserového triangulačního systému, (Bernardini, 2002)	11
Obr. 2: Princip měření polárního skeneru (Štroner, 2013)	12
Obr. 3: Skener se základnou – jednokamerový (Štroner, 2013).....	13
Obr. 4: 3D laserový skener Leica BLK360 s tabletem Apple iPad Pro, (www.leica-geosystems.com)	19
Obr. 5: Chodba zobrazená ve formě bodového mračka	21
Obr. 6: Schodiště ve formě bodového mračka.....	22
Obr. 7: Socha kardinála Berana ve formě bodového mračka	22
Obr. 8: Přibližné výsledky výpočtu absolutních vzdáleností, uvedené v metrech	26
Obr. 9: Porovnání dvou mračen – hypsometrická škála.....	27
Obr. 10: Porovnání dvou mračen – histogram – na vertikální ose je počet bodů, na horizontální ose je absolutní vzdálenost dvou mračen v metrech	27
Obr. 11: Přibližné výsledky výpočtu absolutních vzdáleností, uvedené v metrech.....	28
Obr. 12: Porovnání dvou mračen – hypsometrická škála.....	28
Obr. 13: Porovnání dvou mračen – histogram – na vertikální ose je počet bodů, na horizontální ose je absolutní vzdálenost dvou mračen v metrech	29
Obr. 14: Přibližné výsledky výpočtu absolutních vzdáleností, uvedené v metrech.....	30
Obr. 15: Porovnání dvou mračen – hypsometrická škála.....	31
Obr. 16: Porovnání dvou mračen – histogram – na vertikální ose je počet bodů, na horizontální ose je absolutní vzdálenost dvou mračen v metrech	31
Obr. 17: Porovnání skenů – BLK360 (vlevo) a Surphaser (vpravo).....	32
Obr. 18: Volba identických bodů při transformaci.....	33
Obr. 19: Chyby na jednotlivých identických bodech	34
Obr. 20: Přibližné výsledky výpočtu absolutních vzdáleností mračka ze Surphaseru od mračka z BLK360 registrovaného ručně v Cyclone; hodnoty jsou uvedeny v metrech	35
Obr. 21: Přibližné výsledky výpočtu absolutních vzdáleností mračka ze Surphaseru od mračka z BLK360 registrovaného automaticky v ReCap pro; hodnoty jsou uvedeny v metrech	35
Obr. 22: Porovnání dvou mračen – hypsometrická škála.....	35
Obr. 23: Porovnání dvou mračen – hypsometrická škála.....	36
Obr. 24: Porovnání dvou mračen – hypsometrická škála.....	36
Obr. 25: Absolutní vzdálenosti mračka získaného pomocí Surphaseru od mračka skenovaného pomocí BLK360 a registrovaného ručně v software Cyclone; hodnoty na horizontální ose jsou uvedeny v metrech.....	37
Obr. 26: Absolutní vzdálenosti mračka získaného pomocí Surphaseru od mračka skenovaného pomocí BLK360 a registrovaného automaticky v software ReCap Pro; hodnoty na horizontální ose jsou uvedeny v metrech.....	37
Obr. 27: Přibližné výsledky výpočtu absolutních vzdáleností, uvedené v metrech	40
Obr. 28: Přibližný výpočet vzdáleností – histogram, hodnoty na horizontální ose jsou v metrech.....	40
Obr. 29: Porovnání dvou mračen z prvního výpočtu – hypsometrická škála	41



Obr. 30: Porovnání dvou mračen z druhého výpočtu – hypsometrická škála	42
Obr. 31: Porovnání dvou mračen – histogram – na vertikální ose je počet bodů, na horizontální ose je absolutní vzdálenost dvou mračen v metrech	42
Obr. 32: Histogram – zobrazená data od 1 do 10 cm, (hodnoty na horizontální ose jsou uvedeny v metrech).....	43
Obr. 33: Histogram – zobrazená data od 2 do 10 cm, (hodnoty na horizontální ose jsou uvedeny v metrech).....	44
Obr. 34: Porovnání světelných podmínek při skenování terče	45
Obr. 35: Úspěšné nalezení terče - 10 m, 20 m, 30 m.....	47
Obr. 36: Chybné vyhledání terče - 40 m, 50 m	47
Obr. 37: Chybová hláška vyhledání terče - 60 m	47
Obr. 38: Úspěšné nalezení terče - 10 m, 20 m.....	48
Obr. 39: Chybné vyhledání terče - 30 metrů a více	48
Obr. 40: Úspěšné nalezení terče - 10 m, 20 m.....	49
Obr. 41: Chybné vyhledání terče - 30 metrů a více	49
Obr. 42: Úspěšné nalezení terče - 10 m, 20 m.....	50
Obr. 43: Chybné vyhledání terče - 30 metrů a více	50
Obr. 44: Porovnání dvou bodových mračen – hypsometrická škála.....	52
Obr. 45: Porovnání dvou bodových mračen – histogram – na vertikální ose je počet bodů, na horizontální ose je absolutní vzdálenost dvou mračen v metrech.....	53
Obr. 46: Detail hlavy sochy kardinála Berana	58



Seznam tabulek

Tabulka 1: Technické parametry laserového skeneru Leica BLK360	20
Tabulka 2: Porovnání objemu dat před a po zředění/ořezání	25
Tabulka 3: Porovnání počtu bodů před a po zředění/ořezání dat	25
Tabulka 4: Výsledné hodnoty výpočtu absolutních vzdáleností	27
Tabulka 5: Výsledné hodnoty výpočtu absolutních vzdáleností	29
Tabulka 6: Výsledky registrace sochy kardinála Berana v Cyclone	30
Tabulka 7: Výsledné hodnoty výpočtu absolutních vzdáleností	32
Tabulka 8: Porovnání výsledků výpočtů absolutních vzdáleností pro ruční a automatickou registraci skenů z BLK360 se skeny ze Surphaseru, [m]	38
Tabulka 9: Výsledné hodnoty výpočtu absolutních vzdáleností	40
Tabulka 10: Výsledné hodnoty výpočtu absolutních vzdáleností	41
Tabulka 11: Porovnání výsledných hodnot z prvního a druhého výpočtu.....	43
Tabulka 12: Porovnání výsledných hodnot automatické registrace	54

Obsah CD

DP_nesrstova.pdf – Text diplomové práce

Chodba_Cyclone.e57 – Chodba registrovaná pomocí software Cyclone

Chodba_Recap.e57 – Chodba registrovaná pomocí aplikace ReCap Pro

Schody_Cyclone.e57 – Schody registrované pomocí software Cyclone

Schody_Recap.e57 – Schody registrované pomocí aplikace ReCap Pro

Kardinal_Cyclone.e57 – Socha kardinála Berana registrovaná pomocí software Cyclone

Kardinal_Recap.e57 – Socha kardinála Berana registrovaná pomocí aplikace ReCap Pro

IMU_rovne.e57 – Data pro test IMU jednotky s horizontovaným přístrojem

IMU_krive.e57 – Data pro test IMU jednotky s neurovnaným přístrojem

Baterka_full.e57 – Data pro testování vlivu mezního stavu nabití baterie – 100 % nabití

Baterka_low.e57 – Data pro testování vlivu mezního stavu nabití baterie – 35 % nabití



Zdroje informací a použitá literatura

BERNARDINI, Fausto, RUSHMEIER, Holly. *The 3D Model Acquisition Pipeline*. IBM Thomas J. Watson Research Center, Yorktown Heights, New York, USA: The Eurographics Association and Blackwell Publishers Ltd, 2002. Dostupné z: <http://www1.cs.columbia.edu/~allen/PHOTOPAPERS/pipeline.fausto.pdf>

BROWN, M., LOWE, D. G. *Unsupervised 3D Object Recognition and Reconstruction in Unordered Datasets*. University of British Columbia: Department of Computer Science. Dostupné z: <http://www.cs.ubc.ca/~lowe/pubs.html>

KAŠPAR, Milan, POSPÍŠIL, Jiří, a kol. *Laserové skenovací systémy ve stavebnictví*. Praha: Vega, 2003. ISBN 80-900860-3-9.

KOCÁB, Milan, VILÍM, David. *Ověřená technologie uplatnění laserového skenování* [online]. Zdiby: Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický, 2016, 2.12.2016 [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: http://www.geometrplan.cz/Rok_2016/Doc/02_Technologie_skenovani_2016.pdf

Leica Geosystems AG: Leica BLK360 Imaging Laser Scanner. *Leica Geosystems* [online]. Switzerland, 2018 [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <https://leica-geosystems.com/products/laser-scanners/scanners/blk360>

MURPHY, M., MCGOVERN, E., PAVIA, S. *The Processing of Laser Scan Data for the Analysis of Historic Structures in Ireland*. The 7th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST. Dublin Institute of Technology: Trinity College Dublin, 2006, 7. Dostupné z: http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegl/downloads/shortpaper_1044_060922.pdf

NESRSTOVÁ, Karolína. *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE: Usedlost Trstěnice č.p. 2 (Litomyšl): tvorba 3D modelu z dat laserového skenování*. Praha, 2016

PAVELKA, Karel, a kol. *Mobilní laserové skenování*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2014. ISBN 978-80-0105261-7.

PAVELKA, Karel, ŠEDINA, Jaroslav, HOUSAROVÁ, Eliška. *PHOTOGRAMMETRIC IBMR TECHNOLOGY AND LASER SCANNING IN CULTURAL HERITAGE DOCUMENTATION* [online]. In: 2017-06-20, s. - [cit. 2018-04-13]. DOI: 10.5593/sgem2017/23/S10.023.

ŠEDINA, Jaroslav. *DIPLOMOVÁ PRÁCE: Porovnání 3D skenovacích metod s mračnem bodů, vytvořeným obrazovou korelací v digitální fotogrammetrii* [online]. Praha, 2012 [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <http://geo.fsv.cvut.cz/proj/dp/2012/jaroslav-sedina-dp-2012.pdf>



ŠTRONER, Martin, a kol. *3D skenovací systémy*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2013. ISBN 978-80-01-05371-3.

VOSELMAN, George, MAAS, Hans-Gerd. *Airborne and terrestrial laser scanning*. Dunbeath, Scotland, UK: Whittles Publishing, 2010. ISBN 978-1-904445-87-6.